



**ESCUELA UNIVERSITARIA DE  
INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL  
DE ZARAGOZA**



**PROYECTO FINAL DE CARRERA**

# **EQUIPO DE MAGNETOTERAPIA CON CONTROL DE PULSOS**

**AUTOR:** Guillermo Gil Alfaro

**DIRECTOR:** Antonio Pardina Carrera

**ESPECIALIDAD:** Electricidad

**CONVOCATORIA:** Septiembre 2011





## *Dedicatoria*

*Quiero dedicar este proyecto a mi familia y amigos, sin su apoyo y ayuda no podría haber llegado a completar esta meta. Especialmente a mi hermano, cuyo recuerdo me da fuerzas para superarme.*







## Índice

INTRODUCCIÓN. ....	8
1. RESUMEN HISTÓRICO. ....	10
2. PRINCIPIOS DE ELECTROMAGNETISMO. ....	20
2.1. Imanes. ....	20
2.2. Inducción magnética y flujo magnético. ....	24
2.3. La Ley de Biot-Savart. ....	25
2.4. Ley de Ampere. ....	28
2.5. Influencia de la materia sobre el campo magnético. ....	29
2.6. Efecto de un núcleo magnético en una bobina.....	30
2.7. Intensidad de campo magnético y permeabilidad magnética.....	31
2.8. Clasificación de los materiales en función de su comportamiento magnético. ....	32
3. GENERALIDADES DE BIOELECTROMAGNETISMO.....	35
3.1. Axioma. ....	35
3.2. Unidades modulares. ....	35
3.3. Termodinámica. ....	36
3.4. Principios. ....	37
3.5. El ciclo celular.....	38
3.6. Leyes.....	38
3.7. Ondas electromagnéticas. ....	39
3.8. Efectos biológicos de los campos magnéticos. ....	41
4. ACCIONES BIOLÓGICAS DE LOS CAMPOS MAGNÉTICOS.....	46
4.1. Efectos Magnetomecánicos.....	46



4.2. Efecto Magnetoeléctrico. ....	47
4.3. Efectos Secundarios. ....	48
5. MAGNETOTERAPIA: TÉCNICAS DE APLICACIÓN CLÍNICA. ....	50
5.1. Características de los campos magnéticos empleados en terapia. ...	50
5.2. Magnetoterapia de alta y baja frecuencia. ....	51
5.3. Aplicaciones Clínicas de los C.M. sobre Órganos en Movimiento.....	54
5.4. Precauciones y Efectos Colaterales. ....	59
6. TRATAMIENTOS DE ENFERMEDADES MEDIANTE MAGNETOTERAPIA. ....	62
6.1. Últimos avances en magnetoterapia. ....	62
6.2. Indicaciones generales y específicas. ....	63
6.3. La reparación de fracturas óseas.....	66
6.4. Osteoporosis. ....	67
7. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO.....	68
8. BOBINA ALIMENTADA A TRAVÉS DE UNA TENSION CON FORMA DE ONDA SENOIDAL. ....	70
8.1. Cálculo de la corriente circulante por la bobina ....	70
8.2. Caracterización eléctrica y constructiva de la bobina.....	74
8.3. Programa para el cálculo de las características de la bobina.....	78
8.4. Gráfica de la corriente y el campo dependiente del tiempo. ....	82
8.5. Dimensiones de la bobina.....	83
8.6. Construcción de la bobina. ....	85
9. BOBINA ALIMENTADA A TRAVÉS DE UNA TENSION CON FORMA DE ONDA CUADRADA. ....	86
9.1. Cálculo de la corriente circulante por la bobina. ....	86



9.2. Caracterización y modelizado de la bobina.....	90
10. DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA GENERAR TENSIÓN DE ONDA CUADRADA CON CONTROL DE PULSOS. ....	95
10.1. Etapa de potencia: rectificación y filtrado. ....	96
10.1.2. Filtrado de la tensión pulsante.....	98
10.2. Etapa de control.....	103
10.2.1. Primer bloque: Multivibrador astable con el LM555. ....	103
10.2.2. Segundo bloque: Transistor trabajando en modo de conmutación. Circuito inversor. ....	110
10.2.3. Tercer bloque: Conexión Darlington. Diodo en antiparalelo con la bobina. ....	118
10.2.4. Fuente de alimentación. ....	124
10.3. Fijación del valor mínimo de campo magnético.....	129
11. SIMULACIÓN DEL DISPOSITIVO ELECTRÓNICO. FORMAS DE ONDA..	132
12. ESTUDIO DE MERCADO BASADO EN LA OSTEOPOROSIS.....	137
12.1. Clasificación de la osteoporosis (clientes potenciales).....	138
12.2. Impacto de la osteoporosis sobre la población.....	139
12.3. Osteoporosis en España. ....	141
13. EFECTOS BIOLÓGICOS DE UN CAMPO MAGNÉTICO VECTORIAL NULO CREADO EN EL INTERIOR DE LA BOBINA.....	148
14. BIBLIOGRAFÍA.....	150



## Introducción.

Se denomina magnetoterapia o Terapia de campos Magnéticos Pulsantes (C.M.P.) al tratamiento mediante campos magnéticos, es decir; es un proceso que utiliza la aplicación de energía magnética al organismo para el tratamiento de distintas enfermedades.

Los Campos Magnéticos Pulsantes de bajas frecuencias están diseñados para ayudar al cuerpo a regenerar sus células y ayudar a acelerar el proceso normal de recuperación. Esta es una modalidad segura de usar, no provoca dolor y no precisa drogas; diseñada para trabajar tanto en problemas en tejidos blandos como en condiciones de huesos dañados. En resumen, la terapia de Campos Magnéticos Pulsantes es una forma relativamente nueva y muy efectiva de terapia física.

El presente proyecto según su aplicación práctica, está encaminado a la terapia sanitaria y pertenece a una ciencia multidisciplinar denominada bioelectromagnetismo; siendo la magnetoterapia en consecuencia, una rama de éste.

El bioelectromagnetismo (a veces denominado parcialmente como bioelectricidad o biomagnetismo) es una nueva ciencia, comprendida dentro de las ciencias biológicas, con grandes aplicaciones en medicina y otras ciencias que contemplan la salud pública y el medio ambiente. Es una ciencia multidisciplinar donde participan biólogos, médicos, veterinarios, químicos, farmacólogos, matemáticos, físicos, ingenieros, sociólogos, expertos en legislación... Tiene por objeto el estudio de los campos electromagnéticos generados por los seres vivos en sus diversas manifestaciones vitales y sus interacciones con los campos electromagnéticos ambientales, tanto los naturales como los artificiales que provocan la llamada contaminación electromagnética, de interés social y sanitario creciente.

Los resultados teóricos y experimentales obtenidos en la investigación del efecto de los campos sobre el ser vivo; hacen numerosos los motivos para el uso de la magnetoterapia. Por tanto las evidencias observadas, hacen que el "equipo de magnetoterapia con control de pulsos" diseñado y analizado en el presente proyecto posea un alto grado de utilidad, siendo los efectos del campo magnético generado por dicho equipo; los siguientes:

- Magníficos resultados en todos los terrenos donde se ha investigado.
- Ínfimos efectos secundarios si se sabe aplicar correctamente.
- Bajo coste de aplicación.



- El envejecimiento de la población lleva a la necesidad del tratamiento de muchas enfermedades degenerativas que la medicina oficial no sabe curar.
- Permite una reducción drástica del consumo de fármacos e intervenciones quirúrgicas con el consiguiente ahorro económico y en salud de la población.
- El coste del equipo de magnetoterapia es mínimo, pudiendo desplazar el tratamiento desde el hospital al ambulatorio o incluso, a nuestra propia vivienda.

Las indicaciones generales de la magnetoterapia son múltiples, englobándose efectos analgésicos, antiinflamatorios, anticontracturantes, relajación generalizada... Estos efectos se usan en procesos reumáticos, trastornos de la osificación (osteoporosis), patologías vasculares, cirugía, neurología, trastornos derivados del estrés...entre otros muchos.

## 1. Resumen histórico.

El origen del término magnetismo existen dos versiones diferentes atribuidas a orígenes griegos y romanos.

**Los griegos prehoméricos** llamaron al óxido ferroso-férrico ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) magnetita, descubierta en Magnesia, ciudad de la provincia de Lidia (Asia Menor). En ella Escipión el Asiático derrotó a Antíoco III en el año 190 a. de C., y de donde probablemente proviene el nombre latino de magnetismo (magnetismus, de magnes, y etis = imán). También se le atribuye el origen de este nombre al procedente de Magnesia, provincia de Tesalia situada en Grecia, cerca del mar Egeo. Según el poeta romano **Lucrecio (95-55 a. de C.)**, **el lapis magnetis** fue encontrado en esta región. Otra versión que ronda en la leyenda es la que relata el romano **Plinio el Viejo (23-79 d. C.)** citando al poeta Nicandro de Colofón (siglo n a. de C.) sobre el pastor Magnes, que estando apacentando su rebaño en el monte Ita sintió cómo las tachuelas de sus sandalias y el cayado de hierro de su bastón eran atraídos, quedando este último suspendido por una roca a la que posteriormente llamarían **piedra de Magnes o magnetita**.

Las propiedades de la piedra imán que atraía al hierro fueron ya descritas por **Tales de Mileto (600 a. de C.)**.



Figura 1.1. Tales de Mileto

**Platón** (quien nombra a esta piedra con el nombre de heraclea) sostenía que estas propiedades eran de procedencia divina, y Aristóteles suponía que el imán tenía «alma».

En el diálogo *Ión*, escrito por Platón, Sócrates dice: *"la piedra no sólo atrae los anillos de hierro, sino que también les imparte una fuerza similar para atraer otros anillos, y algunas veces puede verse una cantidad de pedazos de hierro y de anillos suspendidos uno del otro hasta formar una cadena bastante larga"*.



El romano **Lucrecio Caro** escribió durante el primer siglo de nuestra era:

*"el hierro puede ser atraído por esa piedra, a la que los griegos llaman magneto por su patronímico, ya que tiene su origen dentro del territorio de los magnetos, y en otro lugar... algunas veces, además, el hierro se aparta de esta piedra, ya que está acostumbrado a apartarse de ella y a seguirla, sucesivamente".*

Desde que se conocieron las peculiares propiedades de la magnetita se siguieron en su utilización dos vertientes diferentes: **O bien una aplicación en la navegación, tanto marítima como terrestre, o bien una aplicación al campo de la terapéutica, a la medicina.**

Desde tiempos muy remotos se ha utilizado el poder beneficioso del magnetismo.

El descubrimiento del magnetismo de las rocas es ancestral. El dato probablemente más antiguo que se conoce, todavía por confirmar, es el que procede del descubrimiento en **África** de una mina de magnetita. Parece ser que este mineral era extraído por el hombre primitivo por sus connotaciones mágicas o religiosas, debido a sus peculiares propiedades, y utilizado terapéuticamente en pócimas, alimentos y aplicaciones tópicas. (Hacmac, 1991)

En **Egipto** ya se utilizaba la magnetita con pretensiones terapéuticas. En el papiro de Eber (3600 A.C.) se relata la aplicación de materiales con componentes hierro-meteoríticos (art pet) para combatir el "nesseg", probablemente infecciones localizadas en la cabeza, como heridas o golpe de calor. Además también se utilizaba la magnetita como amuleto.

En **México**, muchos años antes de la llegada de los españoles a tierras americanas, las antiguas culturas precolombinas, como la cultura olmeca, utilizaban ya barras de este material, que hacían flotar sobre líquidos en recipientes, con el fin de orientar la construcción de sus edificios de carácter mágico-religioso y, sobre todo, astronómico (Malmstrom, 1976).

En la **literatura antigua**, la magnetita o imán natural se encuentra nombrado de formas muy diferentes, así lo encontramos en libros **hindúes vedas** con el nombre de **chumbuk o piedra que besa**; en **sumerio** era llamado **uru-du-an-na (mineral del cielo)**; en **Babilonia**, **sadana sabitu (atraer) o sadana baltu (hierro vivo)**; en **Egipto**, **art pet (hierro meteorítico) o bj'u (mineral del cielo)**. Entre los **helenos** también se le dio el nombre de **heraclea o piedra de Hércules**, por ser éste capaz de plegar el hierro, y por tanto era más fuerte que él. También podemos encontrar otras denominaciones como **sideritis, calamita y theamades o piedra que mueve el hierro**.

**Hipócrates**, celebre médico griego, sustrae la medicina de las prácticas religiosas de su época y es considerado el fundador de la medicina experimental. Su obra, la de su escuela y la de sus discípulos, escrita en dialecto jónico, y recogida por la escuela de Alejandría en el "Corpus

Hippocratum" relata la utilización de la **magnetita** en obstetricia y en diferentes **afecciones intestinales**.

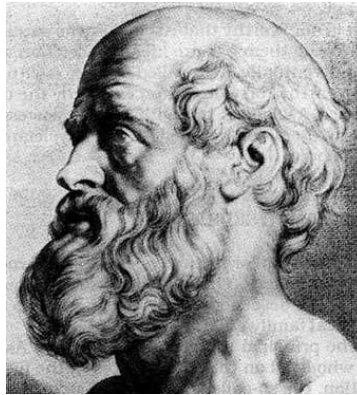


Figura 1.2. Hipócrates

**Zenon de Citium, (336-364 A.C.)**, fundador de la escuela estoica, alumno del cínico Crates, megárico Estilpón y del académico Polemón, en su libro "Sobre las pasiones" introduce el concepto de simpatía; todo el proceso cósmico está basado sobre una ley fatal de necesidad, que, en cuanto racional se identifica con la misma providencia divina. El concepto de simpatía establece la posibilidad de que el hombre, por medio de determinados elementos, piedras por ejemplo, puede influir directamente sobre aquellos elementos invisibles, divinos o demoníacos que constituyen de alguna manera la esfera de acción del mundo sensible. La antigua práctica sacerdotal, limitada y secreta, solo utilizada en ritos y ceremonias, tiende a introducirse poco a poco en la medicina popular.

**Cayo Plinio Segundo**, escritor latino más conocido por el nombre de Plinio el viejo, en su *Naturalis Historia*, tratado de las más variadas materias, entre ellas la medicina, establece el **poder terapéutico de la magnetita**, y refiere la aplicación de la misma en afecciones oculares o disturbios urinarios entre otros, finalmente **Pedanio Dioscorides**, en su libro "De materia médica" generaliza la aplicación clínica de la piedra magnética.

**Claudio Galeno (131-210)** famoso médico romano, el más importante después de Hipócrates, logro organizar toda la ciencia médica de su tiempo según principios originales basados en la investigación y en el análisis crítico de los fenómenos observados; establece de una manera formal las acciones curativas de la magnetita.

Entorno al año 550, **Ezio de Amida**, en Mesopotamia, escribía: "La piedra magnética tiene una acción similar a la del **hematite**, **atenúa los dolores** y tiene efectos curativos en los espasmos". Posteriormente, el filósofo y médico árabe **Avicena (980-1037)** en su obra "El canon de la medicina" establece el magnetismo como una fuerza específica y propia de carácter netamente curativa.



En el **siglo XII** cuando occidente, conocedor ya de la obra griega y latina, marca las pautas para lo que en adelante será una ciencia de amplia difusión y de estricta aplicación médica: **La Magnetoterapia**. Las aplicaciones terapéuticas se realizan mediante pociones líquidas, que el paciente ingiere, o bien en forma de ungüento o pomada aplicada directamente sobre la zona aquejada de mal, igualmente se generaliza la práctica de los amuletos de magnetita. De alguna manera resurgen los modos y estilos egipcios de los remotos años 3000 A.C.

La acción terapéutica de la magnetita, no solo se establece como una consecuencia del carácter astrigente o estimulante de su contenido férrico sino también como resultado de los campos de fuerzas magnéticas generados. En un trabajo de **Hildegard Von Bingen (1098-1179)** se lee textualmente: "Se baña la piedra magnética con saliva del paciente, se aplica a su frente y se pronuncia el conjuro con el que el poder de Dios elimina el poder del Diablo....."

**Gentile de Fuligno, en Padua (1348)**, nos describe el tratamiento seguido en una hernia "...Por vía interna se administra una poción constituida principalmente por limaduras de hierro y durante la noche se aplica a la hernia una piedra magnética. A causa del flujo y reflujo de la fuerza magnética y a las atracciones ejercidas sobre las limaduras de hierro, la hernia entra en movimiento y retrocede". Posteriormente este efecto terapéutico es ridiculizado por un colega de Gentile, también de Papua.

El término «magnetismo» fue empleado por primera vez por **Agrippa de Nettesheim (1531)** en su obra De occulta philosophia. Hasta ese momento se utilizaba sobre todo la expresión vis magnética.

La magnetoterapia va siendo objeto de discusión y de confrontamientos, va ya alcanzando categoría de auténtica ciencia experimental. Difícilmente encontraremos en esta época medieval un médico que trabajase más y profundizase más en este campo de la acción medicinal de los imanes que **Theophrast Bombast Von Hoheneim**, conocido por **Paracelso**.

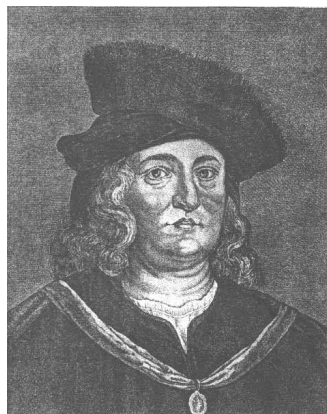


Figura 1.3. Paracelso

En su obra **"Labyrynyhus medicorum errantium"** define la **existencia en los imanes de un polo norte y un polo sur y es la aplicación sistemática y alternativa de esos polos a las zonas enfermas**, la base de los espectaculares éxitos que consigue. Epilepsias, trastornos histéricos, tumores, hemorragias de diversos tipos son una muestra de la variada casuística que nos relata en su obra, médica.

Es atribuida igualmente a Paracelso la utilización de la llamada **"Pomada militar"** fabricada con materiales magnéticos, que fue extraordinariamente utilizada durante las numerosas campañas militares de la época.

**Johan Bapt (1644)** prosigue la obra de Paracelso, ampliando los conocimientos que aquel fijó sobre la irradiación del cuerpo humano y sus excreciones.

Las cualidades médicas de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y de la hematita ( $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) fueron descritas por **William Gilbert de Colchester**, médico en la corte de la Reina Isabel I de Inglaterra. En **1600** publica su monumental tratado **De Magnete, Magneticisque Corporibus et De Magno Magnete Tellure (Sobre el Magnetismo y Cuerpos Magnéticos y Sobre el Gran Imán Tierra)**, donde se comparan las fuerzas magnéticas con las fuerzas de la vida y se proclama que la Tierra es un gigantesco imán. Se establecen así los fundamentos de la concepción moderna del magnetismo. La publicación resume dieciséis años de estudio de las interacciones de pequeñas agujas de hierro con esferas de magnetita llamadas terrelas o pequeñas «tierras». «La Tierra es el imán más perfecto», y supone que el magnetismo superficial de ésta proviene de las materias magnetizadas que están en su interior.



Figura 1.4. William Gilbert



Figura 1.5. De Magnete

La obra de **Gilbert**, **«padre de la filosofía magnética»**, como le llamaron sus contemporáneos, es un triunfo de la ciencia experimental y prueba el mecanismo de acción del campo magnético. Gilbert estaba

convencido del valor de los métodos y los experimentos científicos, afirmando:

*En el descubrimiento de los secretos y en la investigación de las causas ocultas de las cosas, son los experimentos fidedignos los que proporcionan las pruebas claras, y no las suposiciones probables y las opiniones de profesores y filósofos vulgares.*

Escribió acerca de la declinación y de la inclinación magnética, diferenció la electricidad del magnetismo e inventó el electroscope. También apuntó que el hierro magnetizado pierde su poder de atracción cuando se le calienta al rojo vivo, pero que lo recupera cuando se enfría.

**René Descartes (Cartesius) (1596-1650)** propuso una **teoría magnética según la cual la fuerza de atracción se produce por la «virtud» del imán**, que es comunicada por unas «partes acanaladas», las cuales atrapan el aire que se encuentra entre los dos cuerpos, haciendo que se acerquen; es decir, el imán y el hierro son empujados el uno hacia el otro por el vacío abierto de esta forma. Proporcionó uno de los **primeros dibujos del espectro magnético**. Postuló que la **glándula pineal**, órgano del tamaño y forma de un piñón, que se encuentra situado en el centro geométrico del encéfalo, era **el asiento del alma**. Adelantándose a su época, consideró a este órgano un centro integrador de las impresiones venidas del exterior a través de los ojos y «túbulos nerviosos».



Figura 1.6. René Descartes

Un resurgimiento del concepto griego de que los imanes estaban animados fue popularizado por **Franz Antón Mesmer (1734-1815)**, médico alemán que llegó a París hacia 1770 con una teoría radical de la salud humana.

Un jesuita **Maximilian Hell (1720-1792)**, director del Observatorio astronómico de Viena, le sugiere a Mesmer utilizar imanes en sus tratamientos.

Esta teoría se refería al **magnetismo animal**, que estaba basada en la filosofía hermética medieval, que unía la astrología, la alquimia y la magia.

La teoría concebía al cuerpo humano como un microcosmos en correspondencia con el macrocosmos.

Mesmer suponía que el **cuerpo humano posee polos magnéticos** que se corresponden con los polos de la Tierra o cósmicos, proclamados por Gilbert.

Sostuvo la existencia de un **fluido imperceptible que fluye de los polos cósmicos a través del cuerpo**. La salud depende de este fluido continuo. **El bloqueo o ruptura de este fluido conduce a la enfermedad**. La salud puede recuperarse al retirar el bloqueo y restablecer el suave fluido.



Figura 1.7. Franz Antón Mesmer

Este se realiza con la **aplicación de imanes en ciertas zonas del cuerpo mediante frotamiento o pases magnéticos**. El tratamiento fue aparentemente eficaz, debido, en gran parte, a que Mesmer obtuvo una gran fama y fue incluso immortalizado en la ópera de Mozart *Così fan tutte*. Sus partidarios se agruparon en la Sociedad de la Armonía, que fue fundada en 1784.

Pasado el tiempo, Mesmer y sus discípulos formalizaron la terapia de grupo, utilizando como placebo en las sesiones de sugestión piezas de madera pintadas semejantes a imanes.

Como la fama de Mesmer y su fortuna se incrementaban, la animadversión de los médicos franceses, expuesta ante la Real Academia Francesa de las Ciencias, hizo que se formara una comisión que informara



sobre el mesmerismo. Entre sus componentes figuraban Lavoisier y quien por entonces era embajador de los Estados Unidos en Francia, Benjamín Franklin. La comisión le declaró como un charlatán e impostor por sus métodos fraudulentos.

Conocida la sentencia por el tribunal académico, los enemigos de Mesmer se apresuran a proclamar el triunfo de la ciencia sobre la medicina psíquica.

No obstante, el mesmerismo tuvo un importante impacto popular. En la monumental obra *Los miserables*, de Víctor Hugo, uno de los personajes queda caracterizado por su hábito de dormir orientado magnéticamente, a fin de que las corrientes magnéticas de su cuerpo llevaran la dirección correcta. Asimismo, Mark Twain, en *Las aventuras de Huckleberry Finn*, incluye el mesmerismo como una de las actividades de los dos embaucadores de la novela.

Así se empañó la teoría del magnetismo animal, que persistió hasta nuestros días.

La mala fortuna de la teoría del magnetismo animal contrasta con el brillante triunfo de la **electricidad animal**, mencionando los experimentos de **Galvani** y de **Volta** de la misma época, que sentaron las bases del conocimiento y desarrollo de los fenómenos eléctricos, por una parte, y su implicación en los seres vivos, por otra.

Sin embargo, descubrimientos significativos en los últimos años requieren una **revisión de la teoría del magnetismo animal**; pero no a través de la versión que dio Mesmer, sino bajo otra perspectiva.

Se sabe hoy en día que algunos organismos precipitan inclusiones de material magnético (**biomagnetita**) y que incluso el hombre en la base del cráneo y en el cerebro presenta este material en forma de **magnetosomas**.

Este fenómeno constituye un punto de partida y centro de futuras investigaciones.

El éxito que alcanzó el desarrollo de la **electricidad animal** comienza con los trabajos de **Luigi Galvani (1737-1798)**, en su célebre controversia con **Alessandro Volta (1745-1827)**, inventor de la pila eléctrica. Sus descubrimientos se produjeron, aproximadamente, en la misma época en la que desarrolló su trabajo Mesmer y llevaron a un extraordinario avance de la bioelectricidad.

Los datos presentados a continuación han sido recopilados y extraídos de la **obra de E. Waldmann (1878), y de sus datos bibliográficos**.

**Unzer, Hamburgo (1775)** es prácticamente el primer médico que nos refiere de manera completa la **aplicación de la magnetoterapia a un**



**cuadro clínico** motivado por un proceso histérico. La paciente, una mujer de 26 años, inicia un lento pero seguro proceso curativo por aplicación a zonas de la cabeza y manos de piedras magnéticas.

**Bolten**, también en Hamburgo y por los mismos años realiza experiencias análogas, pero ya utilizando **imanes artificiales** y obtiene éxitos importantes en la curación de pacientes afectados de **procesos paralíticos**.



Figura 1.8. Luigi Galvani

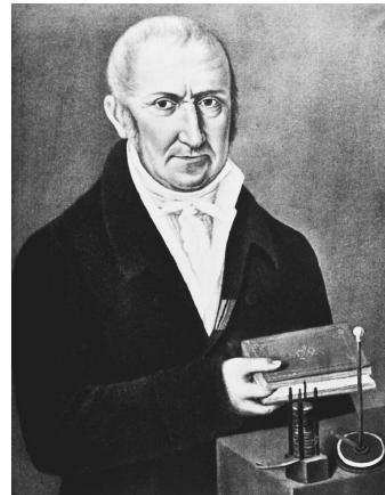


Figura 1.9. Alessandro Volta

**De Harsu** en la **Gazette Salulaire 1776, 33, cfr, Journal Encyclopedique 1776-1779**, refiere el caso de un paciente, varón de 46 años, que tras cinco años de tener **paralizadas las extremidades inferiores, tras aplicación directa de cinco imanes en pies y otras zonas próximas, recupera el movimiento**. Es de señalar como dato significativo, que todos los autores refieren en cuanto a los efectos primarios de la magnetoterapia una **sensación de calor en las zonas de aplicación así como un incremento de la actividad urinaria e intestinal**.

Numerosas referencias de médicos franceses han sido recopiladas en la obra de Waldmann.

-Daquier (Biblioteca de las ciencias y de las bellas artes, 1766) aplicación a dolores dentales.

-De la Codamine (Journ, de Méd, et Chir, par Roux, París, 1767) neuralgias dentales.

-De la Roche (Gazetta Salulaire, 1778) regulación de la menstruación.



En los finales de **1777, Le Noble**, que utilizaba un potente **imán artificial** invita a la Sociedad de Medicina Francesa a estudiar la eficacia del mismo. La academia acepta tal requerimiento y nombra comisarios a los señores Androy y Thouret, que estudian los diversos casos patológicos tratados. La mayoría de los **resultados son altamente satisfactorios: neuralgias dentales, dolores oculares, neuralgias gástricas, convulsiones torácicas, cólicos renales.....** Los comisarios anteriormente citados consideran que el magnetismo tiene una acción sobre el cuerpo humano real y terapéutica, que esta acción es distinta a la de otros medios físicos, tales como el frío, la presión,... y que su acción es inmediata y directa sobre el sistema nervioso. La magnetoterapia ha sido aceptada de manera formal por la sociedad médica. **Laennck (1826)** recomienda la aplicación de campo magnético para la curación de dolores torácicos. **Keil, en Alemania (1824)**, utiliza imanes de alta intensidad, hasta entonces desconocidos, la fuerza atractiva de los mismos era del orden de 300 a 400 libras (1 libra = 0.5Kg). Con estos imanes obtiene excelentes resultados relatados en su trabajo **"Der Mineralische Magnetismus", Erlangen, 1846**, los imanes han sido empleados siguiendo direcciones establecidas físicamente en torno a los meridianos magnéticos.

**Clemens, 1872**, contribuye al proceso de estos métodos con un nuevo concepto: **nuestro organismo, y** fundamentalmente **la sangre**, gracias a su contenido en hierro, es fundamentalmente **paramagnético**, mientras que todas las **sustancias** generalmente **tóxicas** son de carácter **diamagnético**, esta idea significó un argumento más a favor del empleo de los campos magnéticos en la curación de diversos tipos de afecciones, por el cambio de polaridad paramagnética que la aplicación de un imán podría provocar sobre el organismo animal.

**En 1869** se utiliza ya una **espira elíptica** que va ha aplicarse alrededor del **cuerpo del paciente a modo de corsé magnético**. La magnetoterapia es ya un hecho real.

*Los imanes han acompañado a la humanidad a través de milenios, el hombre discutió, unas veces a favor, otras en contra de esta piedra, pero hay un hecho innegables, su fuerza convenientemente canalizada es un arma eficaz para la lucha contra la enfermedad.*

## 2. Principios de electromagnetismo.

### 2.1. Imanes.

Como ya se ha comentado anteriormente los primeros fenómenos magnéticos estuvieron relacionados con los imanes naturales que son los minerales de hierro encontrados por primera vez en Magnesia.

Los imanes son capaces de atraer objetos de hierro, níquel, cobalto y sus derivados. Los imanes pueden ser:

- **Naturales:** Aquellos que poseen propiedades magnéticas naturales, como por ejemplo un mineral conocido como magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).



Figura 2.1. Magnetita

- **Artificiales:** Son barras de hierro o acero que han adquirido la propiedad magnética por frotamiento con otro imán o por la acción de corrientes eléctricas.

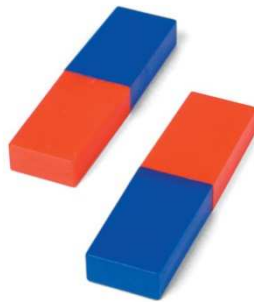


Figura 2.2. Imanes

Los imanes artificiales pueden ser temporales o permanentes:

- **Temporales:** Las propiedades magnéticas solo existen mientras actúa la causa exterior imanadora. Son de hierro.
- **Permanentes:** Mantienen las propiedades magnéticas después de haber cesado la causa imanadora. Son de acero.



Los imanes se caracterizan por su campo magnético, que es el espacio situado a su alrededor en el que se manifiestan sus acciones magnéticas sobre otros cuerpos. Las zonas en que el magnetismo aparece más concentrado que en el resto del espacio se denominan polos magnéticos del imán (Norte y Sur). El campo magnético se observa colocando un trozo de cartulina sobre un imán y espolvoreando limaduras de hierro. Estas limaduras se orientan formando unas líneas que se llaman líneas magnéticas o líneas de fuerza, las cuales parten de un polo y entran por el otro. Se ha establecido un sentido convencional para el sentido de las líneas de fuerza, de tal modo que salen del polo Norte, recorren el exterior del imán y entran por el polo Sur. Las líneas de campo magnético tienen la propiedad de ser cerradas sobre sí mismas, por lo tanto, por el interior de un imán circulan de Sur a Norte.

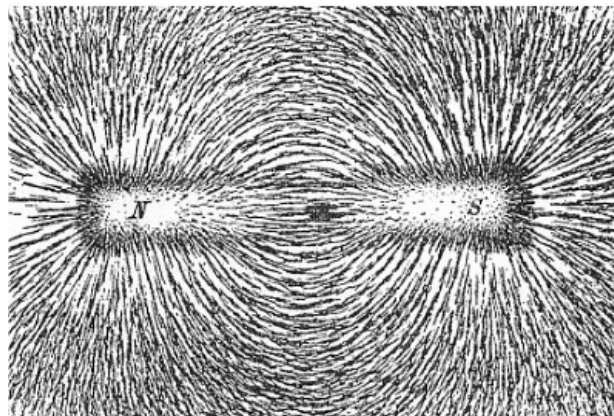


Figura 2.3. Líneas de fuerza representadas por limaduras de hierro

La fuerza que ejerce un imán sobre un objeto de hierro o la fuerza de interacción entre dos imanes va disminuyendo a medida que aumenta la separación entre ellos. Este efecto se debe a que el campo magnético se hace más débil a medida que nos vamos separando del imán. El campo magnético se expresa mediante el vector  $B$  cuya unidad es el tesla para el Sistema Internacional y el gauss para el Sistema Cegesimal ( $1 \text{ T} = 10 \text{ Gs}$ ).

La tierra constituye un gran imán, de tal modo que si suspendemos una varilla magnetizada en cualquier punto de la superficie terrestre y la dejamos mover libremente alrededor de un eje vertical, la varilla se orientará en la dirección Norte-Sur, de forma que siempre el mismo extremo de ella apuntará hacia el polo Norte geográfico. De ello se deduce que un imán tiene dos clases de polos magnéticos que se denominan Norte (N) y Sur (S), correspondientes respectivamente a los polos que apuntan hacia el Norte geográfico y hacia el Sur geográfico.



Figura 2.4. Polos de la Tierra

La brújula es una lámina fina y alargada de acero imantado, dispuesta sobre una punta muy fina, sobre la cual puede girar libremente. Por lo tanto es un imán permanente muy ligero que puede girar alrededor de un eje. Cuando la brújula se deja libremente bajo la acción del campo magnético terrestre ésta siempre se orienta en la dirección Norte-Sur geográfica. La punta que indica hacia el Norte geográfico de la tierra se indica pintándola de color negro o rojo, o marcando una flecha. El extremo de esta punta corresponde al polo magnético Norte y el otro extremo corresponde al polo magnético Sur.

Los polos magnéticos de imanes distintos interactúan entre sí, de tal modo que los polos del mismo nombre se repelen y los de distinto nombre se atraen.

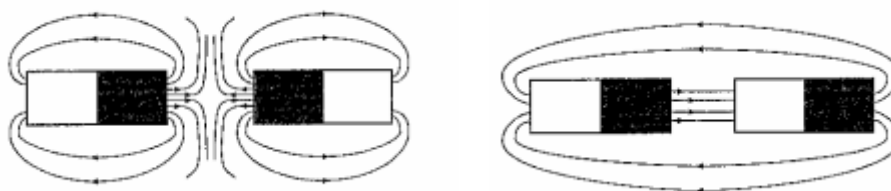


Figura 2.5. Repulsión y atracción de imanes

Debido a la propiedad que tienen los polos de distinto nombre de atraerse entre sí, se deduce que la tierra que constituye un gran imán, tiene un Sur magnético situado sobre el polo Norte Geográfico y viceversa, un Norte magnético situado sobre el polo Sur geográfico.

Aunque ha sido posible aislar cargas eléctricas positivas y negativas, no ha sido posible aislar un polo magnético. Los cuerpos magnetizados siempre presentan pares de polos iguales y opuestos.

La relación entre el magnetismo y la electricidad fue descubierta en 1819 por Oersted al descubrir que una corriente eléctrica que circula por un hilo rectilíneo desvía la aguja imantada de una brújula cercana. Poco tiempo después Ampere obtuvo las leyes cuantitativas de la fuerza magnética entre conductores que llevan corrientes eléctricas. También Ampere propuso un modelo teórico para explicar el magnetismo de un imán permanente, según el cual, se debe a órbitas de corriente eléctrica de magnitud atómica.

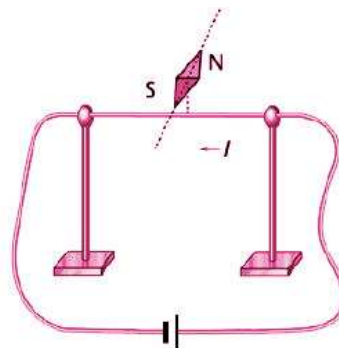


Figura 2.6. Experiencia de Oersted

En 1820 Faraday descubrió que se podía producir corriente eléctrica en un circuito moviendo un imán cerca de él, con lo cual demostró que un campo magnético produce un campo eléctrico. De este modo se establece que los campos eléctricos y magnéticos están relacionados entre sí.

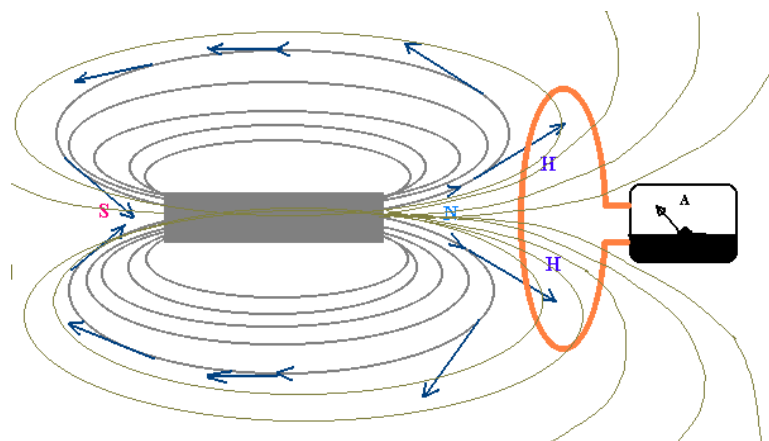


Figura 2.7. Experiencia de Faraday

## 2.2. Inducción magnética y flujo magnético.

Tal como se ha comentado, el campo magnético se puede observar espolvoreando limaduras de hierro sobre una cartulina. Por ejemplo si espolvoreamos limaduras finas de hierro sobre una cartulina o una placa de cristal, de manera uniforme, y colocamos la placa encima de un imán recto; golpeando ligeramente la placa, para hacer saltar las limaduras, veremos que éstas se desplazan y se reparten en líneas que van de un polo al otro.

Si además colocamos, al azar, pequeñas agujas imantadas, observaremos que estas agujas se colocan por todas las partes siguiendo la dirección de la tangente a línea de limaduras. Las líneas materializadas por las limaduras se denominan líneas de fuerza o líneas de campo magnético.

### **Propiedades de las líneas de fuerza:**

1- Las líneas de fuerza se orientan de Norte a Sur por el exterior de un imán y de Sur a Norte por el interior. Por lo tanto las líneas de campo magnético son cerradas sobre si mismas. No pueden partir de un punto y acabar en otro.

2- Las líneas de fuerza nunca se cortan. Es decir, por un punto pasa una línea de fuerza y solo una.

Si hubiera dos, habría dos orientaciones posibles de una aguja imantada, lo que desmiente la experiencia.

3- Hay infinitas líneas de fuerza; las limaduras sólo materializan algunas.

4- En el espacio un haz de líneas forma un tubo de fuerza: A través de un tubo de fuerza, el número de líneas es constante.

En zonas donde las líneas están más concentradas el campo magnético es más intenso, mientras que en zonas donde están más separadas el campo es más débil.

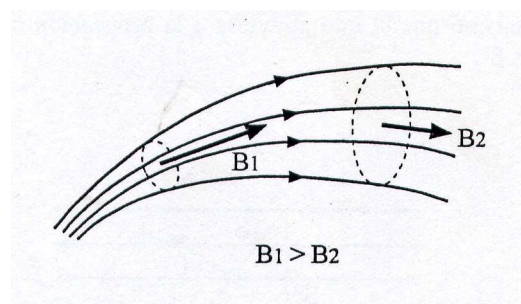


Figura 2.8. Líneas de fuerza

Si el tubo tiene una sección constante, las líneas de fuerza son paralelas y el campo es uniforme.



De todo lo anterior se deduce que el campo magnético se puede representar cualitativamente por líneas de fuerza, sin embargo es necesario disponer de una magnitud cuantitativa que pueda definir el campo magnético en cualquier punto del espacio. Para ello se introduce un vector denominado inducción magnética  $B$ .

**Inducción magnética  $B$ :** La inducción magnética en un punto se puede definir como la cantidad de líneas de fuerza que pasan por la unidad de superficie perpendicular a la dirección de las mismas. Es decir, la inducción en un punto se puede expresar en líneas por unidad de superficie. La inducción magnética es una magnitud vectorial que se representa por la letra  $B$ . La dirección del vector  $B$  es tangente a la línea de fuerza y su sentido coincide con el de la línea.

**Unidad de inducción:** La unidad de inducción en el Sistema Internacional (M.K.S) es el tesla (T), que podría definirse como la inducción que, en dirección perpendicular a un hilo de 1 m de longitud y atravesado por una corriente de 1 A, desarrolla sobre el hilo una fuerza de 1 newton.

También es muy frecuente utilizar la unidad del Sistema Cegesimal (C.G.S.) que es el gauss (G).

**Flujo magnético ( $\Phi$ ):** Es el número total de líneas de inducción magnética que atraviesan una superficie dada.

### 2.3. La Ley de Biot-Savart.

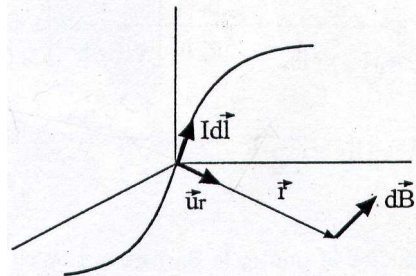
En 1819 Oersted descubrió que la aguja imantada de una brújula se desvía por la presencia de una corriente eléctrica, con lo cual deduce que las corrientes eléctricas producen campos magnéticos de la misma naturaleza que los imanes. Poco tiempo después, Biot y Savart llegaron a una expresión matemática que permitiría calcular el campo magnético que produce una corriente.

Para formular matemáticamente la ley de Biot-Savart debemos definir los elementos de corriente. Para ello un hilo conductor de cualquier forma y sección transversal uniforme, pero de espesor despreciable, lo descomponemos en pequeños segmentos de longitud  $d\vec{l}$ .

Elemento de corriente: es el producto del segmento  $d\vec{l}$  por la corriente  $I$ :  $I d\vec{l}$

$I d\vec{l}$  tiene carácter vectorial, cuyo módulo es el producto de la corriente por la longitud del segmento  $d\vec{l}$ , la dirección es tangente al conductor y el sentido es el que indica la corriente.

Ley de Biot-Savart: establece que la inducción magnética  $\vec{dB}$  que crea un elemento de corriente viene dado por la expresión:



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

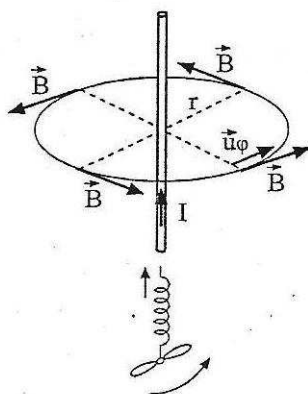
Figura 2.9. Elemento de corriente

De esta ley se observa que el campo magnético decrece con el cuadrado de la distancia al elemento de corriente, al igual que el campo eléctrico decrece con el cuadrado de la distancia a la carga. La expresión diferencial de la ley de Biot-Savart proporciona el campo magnético en un punto dado para un pequeño elemento de corriente. Para encontrar el campo B en algún punto debido a un conductor de tamaño grande, se deben sumar las contribuciones de todos los elementos de corriente que constituyen el conductor. Es decir, se debe integrar a lo largo de todo el conductor.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

Aplicando la Ley de Biot-Savart se puede calcular el campo magnético creado por distintas geometrías de corriente.

**a) Campo magnético creado por una corriente rectilínea indefinida de espesor despreciable.**



$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \vec{u}_\phi$$

Figura 2.10. Campo creado por una corriente rectilínea



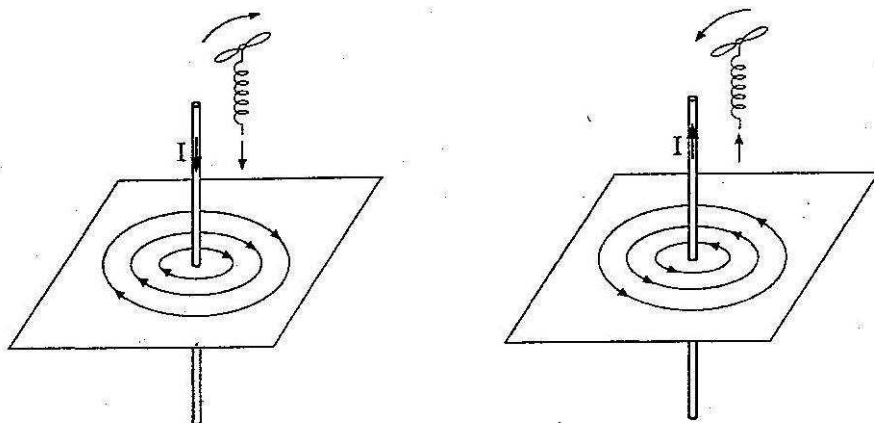


Figura 2.11. Sentido de las líneas de campo.

**b) Campo magnético creado por una espira circular en puntos de su eje.**

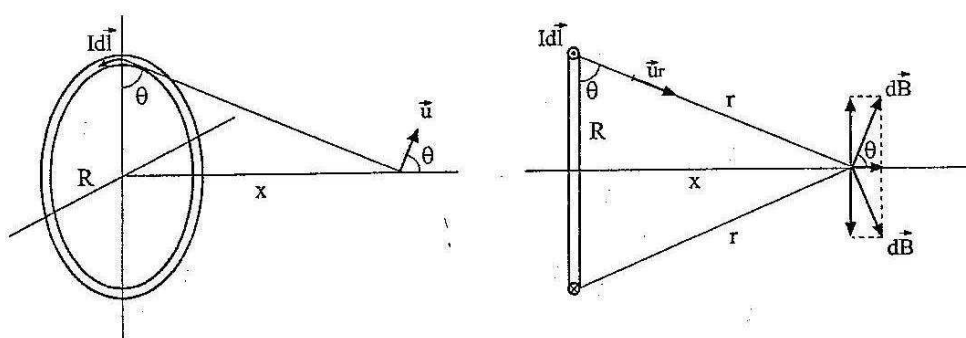


Figura 2.12. Campo magnético creado por una espira.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \vec{k} \quad \text{En el centro de la espira (x=0) } \rightarrow \quad \vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2R} \vec{k}$$

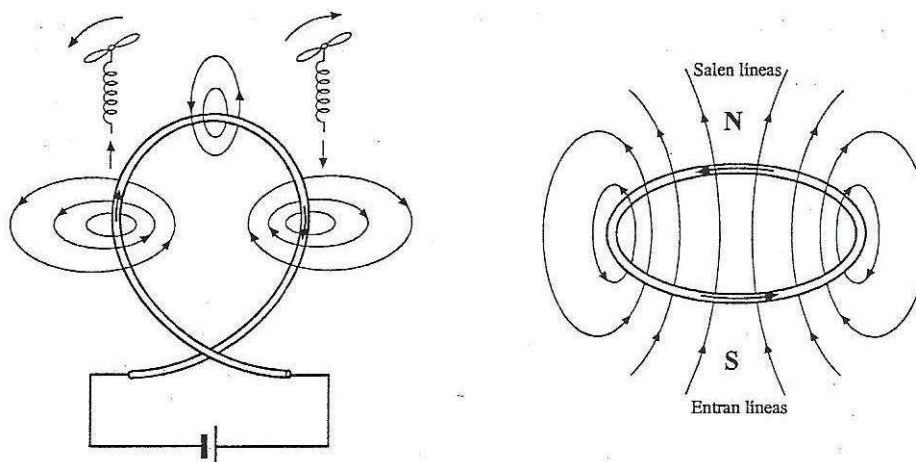


Figura 2.13. Sentido del campo en la espira.

### c) Campo magnético creado por un solenoide recto.

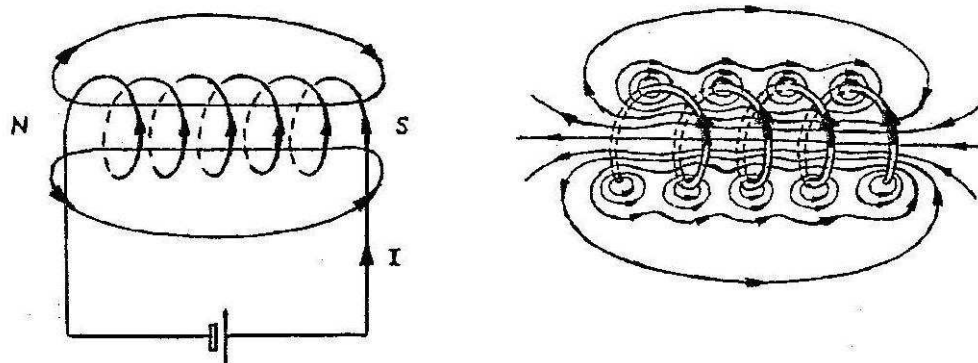
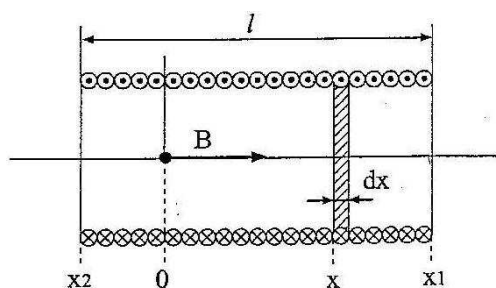


Figura 2.14. Líneas de campo magnético en el solenoide.



$$n = \frac{N}{l}$$

$n = \text{N}^\circ \text{ de vueltas por unidad de longitud}$

Figura 2.15. Sección del solenoide.

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 n I}{2} \left[ \frac{x_1}{\sqrt{R^2 + x_1^2}} - \frac{x_2}{\sqrt{R^2 + x_2^2}} \right]$$

Para un solenoide tal que su longitud  $\gg$  diámetro

$$\vec{B} = \mu_0 n I$$

## 2.4. Ley de Ampere.

En muchas situaciones resulta complicado calcular el campo magnético a través de la ley de Biot-Savart. Sin embargo en casos donde se dan ciertas condiciones de simetría resulta muy sencillo el cálculo del campo magnético a través de lo que se conoce como ley de Ampere.

**Ley de Ampere:** la circulación del campo magnético a lo largo de una trayectoria cerrada es proporcional a la corriente total que abraza esa trayectoria. La constante de proporcionalidad es la permeabilidad del vacío  $\mu_0$ .



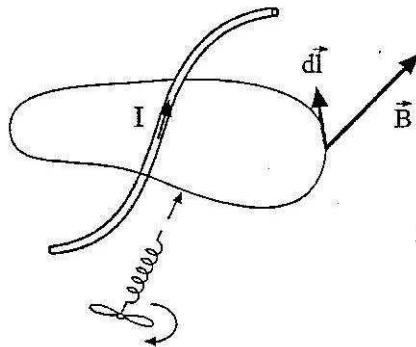


Figura 2.16. Aplicación de la Ley de Ampere

## 2.5. Influencia de la materia sobre el campo magnético.

El campo magnético se ve alterado cuando se introduce un material en el interior de él. Se puede influir de modo que aumente o disminuya el campo aplicado, dependiendo de la naturaleza del material.

Esto se debe a que los átomos tienen electrones girando alrededor del núcleo atómico y por tanto equivalen a pequeñas espiras de corriente de dimensiones atómicas. Estas espiras de corriente crean su campo magnético que interactúan con el campo principal.

En realidad el electrón tiene dos tipos de movimiento, un movimiento orbital que es el giro del electrón alrededor del núcleo y un movimiento del electrón girando sobre sí mismo denominado espín. Ambos movimientos en giro pueden considerarse equivalentes a minúsculas espiras de corriente.

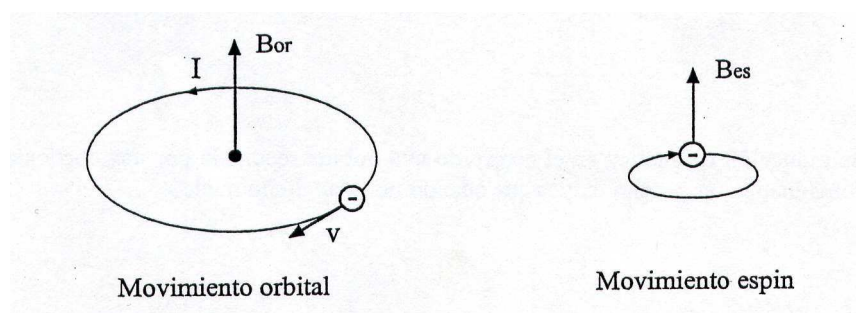


Figura 2.17. Movimientos orbitales del electrón.

Según se observa en la figura anterior el sentido de corriente es opuesto al sentido de giro del electrón debido a que su carga es negativa, y tal como se estableció por convenio, la corriente circula en sentido opuesto al movimiento de las cargas negativas. Cada átomo crea un campo

magnético debido a sus corrientes atómicas, por lo tanto, equivale a un pequeño imán llamado dipolo magnético.

Mientras que los cuerpos no sufran ninguna influencia magnética, estos dipolos o imanes elementales tienen todas las orientaciones posibles de modo que sus campos magnéticos se compensan unos con otros. En esta situación el cuerpo no tiene ninguna propiedad magnética.

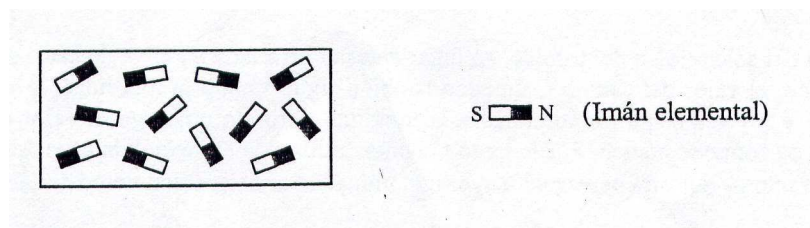


Figura 2.18. Dipolos magnéticos

## 2.6. Efecto de un núcleo magnético en una bobina.

Según la explicación anterior, en una barra de hierro sus átomos forman pequeños imanes elementales y si nunca ha sido sometido a ninguna acción magnética exterior, los imanes elementales están dispuestos desordenadamente originando un campo magnético resultante nulo.

La experiencia demuestra que si se introduce un núcleo de hierro en el interior de una bobina recorrida por una corriente, determina un aumento del campo magnético. Esto es debido a que al estar sometido el núcleo de hierro al campo magnético creado por la bobina, se imanta fuertemente, ya que sus imanes moleculares se orientan y crean, por sí mismos, un campo suplementario que refuerza al campo creado por la bobina. Por esto, se dice que el hierro y sus derivados ofrecen gran facilidad al establecimiento de las líneas de fuerza.

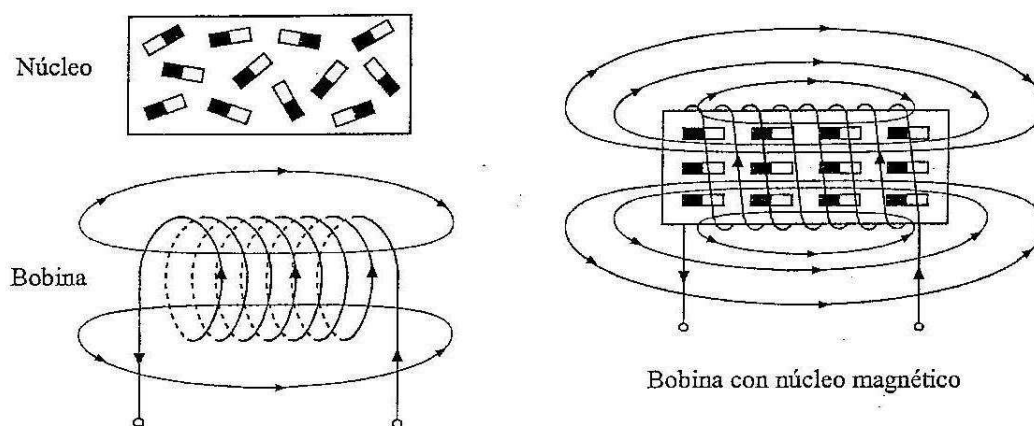


Figura 2.19. Núcleo magnético fuera y dentro de la bobina



El valor de la inducción magnética en el centro de una bobina recorrida por una corriente cuando tiene un núcleo ferromagnético, es mucho mayor que cuando no tiene dicho núcleo.

## 2.7. Intensidad de campo magnético (H) y permeabilidad magnética ( $\mu$ ).

Según hemos visto en el apartado anterior, al introducir un núcleo de hierro dentro de una bobina refuerza el magnetismo. Así mismo hay otros materiales como el cobalto, níquel, y derivados del hierro que también refuerzan el campo magnético.

También hemos estudiado que el campo magnético en el interior de un solenoide largo de longitud  $l$ , o bien para una bobina en forma toroidal donde  $l$  es la longitud media de su circunferencia, viene dado por:

$$B_0 = \mu_0 \frac{NI}{l}$$

Si la bobina del solenoide o del toroide, en lugar de estar arrollada en el vacío está dispuesta sobre un núcleo magnético, el valor del campo magnético también sigue siendo proporcional a la corriente, al número de espiras, e inversamente proporcional a la longitud, pero sin embargo el valor del campo es mayor que cuando no contiene núcleo. Por lo tanto podemos utilizar la expresión anterior sustituyendo la permeabilidad del vacío  $\mu_0$  por otra constante mayor denominada permeabilidad del material  $\mu$ .

$$B = \mu \frac{NI}{l}$$

Así pues, vemos que la fórmula consta de dos factores:

- a) Uno depende del material:  $\mu$ =permeabilidad.
- b) Otro que depende de la geometría, dimensiones y corriente del circuito:  $NI/l$

Para analizar independientemente la influencia que ejercen el campo magnético  $B$  sobre el núcleo y el circuito, se define el concepto de intensidad de campo  $H$ , que es un vector de la misma dirección que la inducción y cuyo módulo para el solenoide largo y el toroide vale:

$$H = \frac{NI}{l}; \quad [H] = A/m$$



De este modo, el campo magnético se podrá expresar en función del material del núcleo ( $\mu$ ) y de la intensidad de campo ( $H$ ).

$$B = \mu \frac{NI}{l} \Rightarrow B = \mu H \quad [\mu] = mT / A$$

La permeabilidad magnética del vacío  $\mu_0$  que es prácticamente que la del aire, se toma de referencia para evaluar la permeabilidad de otros materiales. De este modo se define la permeabilidad relativa de un material, como el cociente de su permeabilidad absoluta dividida por la del vacío.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Por lo tanto el campo magnético se podrá expresar:

En definitiva, para un solenoide largo y para un toroide, podremos expresar el campo en su interior ya sea con núcleo o ya sea sin núcleo de la siguiente manera:

a) Con núcleo

$$B = \mu H$$

b) Sin núcleo

$$B = \mu_0 H$$

En cierto modo la intensidad de campo  $H$  es la capacidad que tiene el circuito de producir líneas de campo magnético.

## 2.8. Clasificación de los materiales en función de su comportamiento magnético.

### a) *Materiales paramagnéticos:*

Los paramagnéticos se caracterizan porque tienen una permeabilidad ligeramente superior a la del vacío, con lo cual, el campo magnético en el interior de un paramagnético será ligeramente superior al campo en vacío. Los medios paramagnéticos tienen tendencia a concentrar muy débilmente las líneas de fuerza.

Material	$\mu_r$
Aluminio	1,000021
Platino	1,00029
Tungsteno	1,000068
Calcio	1,000019
Magnesio	1,000012
Aire	1,00000036

Tabla 2.1. Permeabilidades de materiales paramagnéticos



Tal como se muestra en la tabla, prácticamente podemos considerar su permeabilidad relativa igual a la unidad, es decir, una permeabilidad absoluta igual a la del vacío. Por ese motivo los efectos magnéticos originados por los materiales paramagnéticos son inapreciables a nivel práctico y por lo tanto se les considera materiales no magnéticos.

### ***b) Materiales diamagnéticos:***

Los diamagnéticos, al contrario que los paramagnéticos, se caracterizan porque tienen una permeabilidad inferior a la del vacío; con lo cual el campo magnético será ligeramente inferior a la campo en el vacío. Por esta razón los medios diamagnéticos tienen una tendencia a expulsar muy débilmente las líneas de fuerza.

En este caso también podemos considerar, al observar la tabla, que la permeabilidad relativa de los diamagnéticos es casi igual a la unidad, es decir, que a efectos prácticos tienen una permeabilidad absoluta como la del vacío. Por lo tanto, los efectos magnéticos que producen los materiales diamagnéticos también son despreciables como en el caso de los paramagnéticos, incluso su influencia es menor que la de los paramagnéticos. Por esa misma razón se les suele denominar materiales no magnéticos.

Material	$\mu_r$
Agua	0,999991
Cobre	0,999991
Plomo	0,999983
Plata	0,999980
Oro	0,999964
Bismuto	0,999983

Tabla 2.2. Permeabilidades de materiales diamagnéticos

### ***c) Materiales ferromagnéticos:***

A diferencia de los materiales paramagnéticos y diamagnéticos a los materiales ferromagnéticos se les suele denominar materiales magnéticos ya que su permeabilidad es muy elevada comparada con la del vacío.

La palabra ferromagnetismo viene del hierro, por ser el primer material en el que se descubrieron estas propiedades magnéticas que dan origen al ferromagnetismo. El ferromagnetismo, a parte del hierro, también se presenta en el cobalto y en el níquel, en aleaciones de estos materiales entre sí y en algunas tierras raras. Estas sustancias al ser sometidas a un campo magnético externo de pequeño valor concentran las líneas de fuerza elevando considerablemente el campo magnético.



Aunque el comportamiento ferromagnético lo presentan una minoría de sustancias, pues generalmente el comportamiento de la mayoría es el paramagnetismo o el diamagnetismo, dichas sustancias ferromagnéticas tienen muchas aplicaciones técnicas, tales como la fabricación de imanes, motores, transformadores, relés, etc.



### **3. Generalidades de Bioelectromagnetismo.**

#### **3.1. Axioma.**

La materia está en movimiento continuo y evoluciona de lo simple a lo complejo. La vida surge en un grado de evolución de esa complejidad material, creando orden frente al caos. La vida se desenvuelve fuera del estado de equilibrio. La vida se caracteriza por la capacidad de autoperpetuarse (reproducirse), autorregularse (metabolismo, homeostasis), generar ritmos (ritmo cardíaco, ritmo sueño-vigilia, etc.) y ciclos (ciclo celular). Para armonizarlos, los ritmos endógenos se sincronizan con los ritmos exógenos (cósmicos) como la sucesión del día y la noche o las estaciones. La luz (Zeitgeber) es el sincronismo principal de estos ritmos y los campos electromagnéticos de extremadamente baja frecuencia (ELF) constituyen el sincronizador adicional. La vida se puede analizar desde sus unidades modulares: las células.

#### **3.2. Unidades modulares.**

Las unidades morfológicas y funcionales de los seres vivos, son las células. Estas se presentan con toda diversidad de formas y tamaños según el trabajo que desempeñan y que conlleva su diferenciación y especialización.

Una célula eucariótica está compuesta por:

- a) Membrana que la separa del medio con el que intercambia constantemente materia y energía. La membrana es como un cuadro de mandos como amplificador de señales (químicas, eléctricas, magnéticas, etc.).
- b) Citoplasma, sustancia coloidal donde se verifican todas las reacciones del metabolismo y que incluye, para mantenerlo, organitos como las mitocondrias. Éstas son las fábricas energéticas por antonomasia. En ellas se fabrica el ATP (adenosintrifosfato), molécula de alta energía, o vector de energía, que es capaz de cederla en cualquiera de sus formas o manifestaciones: cinética (mecánica, eléctrica, magnética, etc.), allí donde la célula lo requiera activamente (es la energía libre de Gibbs) o guardarla como energía potencial en compartimentos estancos o reservorios en forma de gránulos de glucógeno y gotas lipídicas.



- c) Núcleo que encierra el material genético o ADN (ácido desoxirribonucleico).

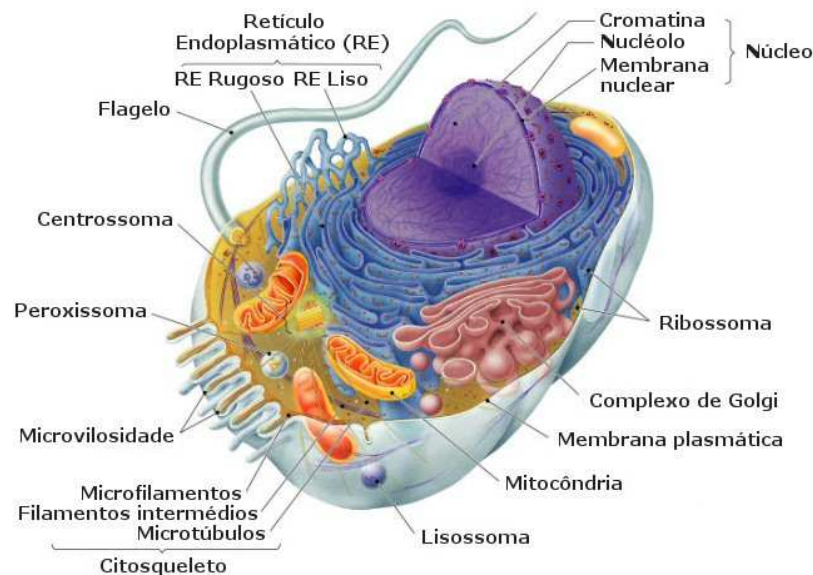


Figura 3.1. Célula eucariota

### 3.3. Termodinámica.

Desde un punto de vista termodinámico la célula es un sistema abierto con puntos sumentes y surgentes de materia y energía. Como hemos mencionado, se encuentra fuera del estado de equilibrio. En su interior se verifica la biotransformación metabólica de la materia en energía libre de Gibbs (antientrópica –la entropía mide el grado de desorden de un sistema- y capaz de biotransformarse para realizar trabajo en energía termomecánica, termoeléctrica, electroquímica, piezoeléctrica, etc.) o quedar almacenada como reserva. Decía Josuah Willard Gibbs, padre de la termodinámica: «*La lucha por mantener la vida orgánica es una guerra por la energía libre*», ya que es fundamental para todas las funciones del cuerpo humano. Gracias a ella, la propia membrana celular que aísla el sistema se mantiene fuera del estado de equilibrio electroquímico (potencial de membrana en estado de reposo con una diferencia de potencial negativa interior con respecto al exterior entre -70mV y -90mV). El campo electromagnético de una célula normal tiene su origen en el movimiento de cargas eléctricas (intercambio iónico, por ejemplo en la membrana celular la bomba de  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ ; en las mitocondrias, los citocromos de la cadena respiratoria son aceleradores de electrones). En este sentido recuérdese la célebre frase de un erudito: «El electrón es tan inagotable como el átomo». Éste en su recorrido orbital es fuente de campos magnéticos, pero también el electrón en su giro o espín constituye un «imán» en miniatura. La lesión se manifiesta (causa/efecto) por el gradiente de polarización eléctrico de la





membrana con entrada de  $\text{Na}^+$  y salida de  $\text{K}^+$  (*síndrome del tejido lesionado*). La muerte consiste en alcanzar el equilibrio (potencial 0).

La evolución de las células enfermas (incluyendo las cancerosas) podría entenderse a favor de un comportamiento físico natural tendente a llegar cuanto antes al equilibrio de las cargas eléctricas, pero en contra de la peculiar naturaleza de la vida que constituye su desequilibrio. Todas las células enfermas manifiestan las mismas características comunes: aumentar la entropía (máximo desorden), disminuyendo la energía libre y la energía potencial del sistema; de ahí el principio terapéutico en contra de la entropía del **«tratamiento metabólico»** (Sodi Pallarés, 1998).

### 3.4. Principios.

En el ser humano, las células, conforme al trabajo que desempeñan (especialización funcional), se agrupan para formar tejidos; los tejidos forman órganos; los órganos, aparatos, y éstos, sistemas.

En el organismo existen dos sistemas de comunicación: el de base química y el de base eléctrica. En el primero (sistema endocrino), las señales de información (mensajes) son las hormonas que se transmiten a través de canales de información: vasos sanguíneos, vasos linfáticos, tubo neural, etc., alcanzando los órganos diana o efectores. En el segundo (sistema nervioso), las señales son electromagnéticas y poseen una red de distribución que se asienta sobre las células neuronales, alcanzando a músculos, corazón, glándulas, etc. Estos dos sistemas han evolucionado paralelamente y colaboran mutuamente desde sus orígenes en perfecta armonía cronobiológica (la cronobiología es la ciencia que estudia los ritmos). Los ritmos y ciclos que en estos sistemas se suceden están coordinados por la glándula pineal (órgano del tamaño y forma de un piñón), que pone a punto o en hora la complicada maquinaria neuroendocrina con relación a los ritmos y ciclos cósmicos a través de su hormona mensajera, la melatonina.

Esta glándula, situada estratégicamente en el centro geométrico del encéfalo, integra la información electromagnética ambiental de sus sincronizadores o temporizadores (Zeitgeber) externos:

- a) A través de la retina, las variaciones periódicas de la luz (luz/oscuridad), como parte del espectro EM, promueven los ritmos diarios o circadianos, estacionales (sincronizador externo principal).
- b) Las variaciones del campo geomagnético o de las radiaciones ELF, micropulsaciones, resonancias de Schumann ( $=7,8\text{Hz}$ ) (sincronizador externo adicional).



### 3.5. El ciclo celular.

Todas las células eucarióticas durante la división celular se someten a un ciclo ordenado de eventos cuyo objetivo es duplicar el material de la célula, especialmente el genético, y repartirlo equitativamente para producir dos células hijas idénticas a la progenitora. Durante este proceso el potencial de reposo transmembrana (PRT) baja (la célula se despolariza) momentáneamente hasta  $-40\text{mV}$ , reponiéndose hasta  $-90\text{mV}$  (la célula se repolariza) al final del mismo. El cáncer es una enfermedad del ciclo celular, donde el PRT está permanentemente bajo. La actividad celular puede ser controlada por señales extracelulares que estimulen o inhiben procesos que se desarrollan en el interior de la célula. Las señales extracelulares pueden ser de varios tipos: químicas, eléctricas, luminosas... electromagnéticas. El proceso por el que una señal externa produce una respuesta intracelular se conoce como **mecanismo de transducción de señal** y éste es el fundamento de la aplicación terapéutica de campos electromagnéticos (señales rítmicas externas adecuadas y beneficiosas) y también del peligro de su contaminación ambiental por uso indiscriminado e incontrolado (señales externas con pérdida del ritmo, inadecuadas y nocivas).

### 3.6. Leyes.

En la teoría unificada del mecanismo básico del control mitótico normal sobre la oncogénesis, Cone señala que el grado de polarización celular es inversamente proporcional al grado de mitosis. Tanto el grado de mitosis como la síntesis de ADN son función del potencial de reposo transmembrana (PRT) que tiene la célula durante una de las fases de su ciclo celular (el período G1). Un PRT alto inhibe la mitosis celular. Un PRT bajo activa la mitosis celular. En la enfermedad cancerosa el PRT de sus células estará considerablemente disminuido y la mitosis celular se intensifica y se vuelve anárquica. Un PRT alto corresponde a una polarización normal. Un PRT bajo corresponde a una despolarización parcial de la célula como la que se encuentra en el síndrome del tejido lesionado.

<b>PRT</b>	<b>entre <math>-70\text{ mV}</math> y <math>-90\text{ mV}</math></b>	<b>Célula normal</b>
<b>PRT</b>	<b><math>-40\text{mV}</math></b>	<b>Ciclo celular activado</b>
<b>PRT</b>	<b><math>-20\text{mV}</math></b>	<b>Célula enferma (tejido lesionado)</b>
<b>PRT</b>	<b><math>-10\text{mV}</math></b>	<b>Célula cancerosa (miosarcoma)</b>
<b>PRT</b>	<b><math>0\text{mV}</math></b>	<b>Muerte celular</b>

El tejido lesionado es negativo respecto al normal. El cáncer está causado por una alteración permanente a nivel celular, debido a un exceso



de cargas negativas en la superficie externa de la membrana celular. (Curé, 1980).

Las células cancerosas están permanentemente despolarizadas por aumento de la concentración del ión sodio en el interior celular. Esta despolarización es la causa principal de la proliferación maligna (ley de Cone).

Las cargas eléctricas negativas en la superficie externa de la membrana celular están principalmente asociadas con residuos negativos del ácido siálico, igual que el ácido N-acetil-neuroamínico (NANA), así como con residuos de grupos del ácido ribonucleico (ARN). El ácido siálico está enlazado a las glucoproteínas y a los glicolípidos y ha sido utilizado como «cáncer maker» (indicador del cáncer); en efecto, en los pacientes cancerosos su concentración aumenta en el suero sanguíneo y en el líquido cefalorraquídeo.

### **3.7. Ondas electromagnéticas.**

La fuerza principal que gobierna la fuerza y la química de la materia es la electromagnética. Como extensión de la materia donde se manifiestan estas fuerzas están los campos eléctricos y magnéticos. Un campo magnético variable genera un campo eléctrico asimismo variable, según la ley de inducción electromagnética de Faraday. Del mismo modo, un campo eléctrico variable da lugar a un campo magnético variable, como consecuencia de la ley de Ampère-Maxwell. En ambos casos, los campos correspondientes generados se relacionan con el campo promotor a través del flujo de campo. Estos campos son interdependientes, a tal extremo que se suele hablar de campo electromagnético único. Las variaciones de campo que se producen en un punto del espacio se transmiten a todo él en forma de onda electromagnética. Los campos electromagnéticos producidos en el organismo humano poseen diversos aspectos de aplicación y son la base del bioelectromagnetismo médico. Se puede afirmar que el mundo físico está compuesto de dos entes básicos: objetos materiales (cuerpos sólidos, líquidos y gaseosos) y ondas.

Hablando en términos generales, una onda es energía pura en movimiento.

Existen ondas que necesitan un medio para propagarse. Tal sucede con el sonido, los ultrasonidos, o las ondas sísmicas. Las ondas electromagnéticas no necesitan, en cambio, ninguno para propagarse, pudiendo correr libremente por el vacío. Las radiaciones electromagnéticas son entes que viajan por el espacio creando un campo eléctrico oscilante asociado a un campo magnético también oscilante. Estas constituyen el llamado espectro de radiación electromagnética, que comprende dos categorías: las radiaciones ionizantes y las radiaciones no ionizantes (RNI), atendiendo a que produzcan o no pares iónicos sobre los cuerpos donde interaccionan.



De manera convencional se ha establecido que una energía fotónica de 12eV, correspondiente a una longitud de onda de 100nm, constituye la línea divisoria entre la radiación ionizante y la no ionizante situada en la región del ultravioleta lejano. Sin tener en cuenta su naturaleza fundamental, todas las ondas poseen las mismas características generales y se incluyen dentro de la física de los fenómenos ondulatorios. Atendiendo a lo anterior, las radiaciones electromagnéticas pueden clasificarse de tres maneras:

1. Por su **frecuencia** ( $\nu$ ) que se define como el número de ondas que pasan por un punto del espacio en la unidad de tiempo y se mide en número de ciclos por segundo o hertzio (Hz).

2. Por su **longitud de onda** ( $\lambda$ ), que es la distancia, medida a lo largo de la línea de propagación, entre dos puntos en fase en ondas adyacentes y se mide en unidades de longitud (que pueden tomar valores en un intervalo de más de 15 órdenes de magnitud).

3. Por su **energía** ( $\epsilon$ ), que es proporcional a la frecuencia: se suele medir en energía por fotón, y su unidad es el electrón-voltio (eV).

La fórmula que relaciona la longitud de onda con la frecuencia es una ley universal en física:

$$\lambda \cdot \nu = c \quad (\text{velocidad de la luz en el vacío } c=300.000\text{km/s})$$

Al interaccionar las RNI con la materia se producen fenómenos de absorción, transmisión y emisión de energía, con cambios de estado en los niveles energéticos de las moléculas, que vienen regidos por la física cuántica.

En orden creciente de energía, los estados excitados o niveles energéticos pueden ser de tres tipos:

**1.- Niveles rotacionales.** Su energía es muy baja, del orden de 0.001 a 0.1 eV. Alcanza a las radiaciones microondas y al infrarrojo lejano.

**2.- Niveles vibracionales.** Su energía varía de 0.1 a 1eV. Incluye además cambios en los niveles rotacionales intermedios. Corresponde al infrarrojo medio.

**3.- Niveles electrónicos.** Su energía supera a 1 eV. Existen también cambios simultáneos en los niveles anteriores (rotacionales y vibracionales). Corresponde a las radiaciones visible y ultravioleta.

Los cambios energéticos moleculares que se verifican en los niveles rotacionales y vibracionales se transforman en energía térmica y las transiciones en energía térmica o energía para producir reacciones fotoquímicas.



Desde un punto de vista médico-clínico el espectro de las RNI se puede dividir esquemáticamente en tres zonas (de menor a mayor longitud de onda).

La primera engloba a las radiaciones solares con su componente visible e invisible (ultravioleta e infrarrojo), es la zona de la fototerapia, que incluye la helioterapia. La aplicación terapéutica de las radiaciones electromagnéticas en general, y de las incluidas en la fototerapia en particular, cumplen los principios de la óptica y se basa en cuatro leyes fundamentales: la ley del cuadrado, la del coseno, la de Grotthus-Draper y la de Bunsen-Roscoe.

La segunda comprende, en general, a las microondas y radiofrecuencias, por un lado del espectro, y a los rayos X y  $\gamma$  (gamma), por el otro. La primera de éstas es la zona de aplicación de las corrientes de D'Arsonval, diatermia, onda corta, onda ultracorta (radarterapia, microterapia), etc.

Los efectos generales de la corriente eléctrica son: térmico, químico y magnético. Las corrientes alternas (AC) o variables en el tiempo incluyen las de baja, media y alta frecuencia. Las variaciones de intensidades de la corriente eléctrica crean un campo electromagnético que se propaga en el espacio en forma de una onda electromagnética de sus mismas características (frecuencia), siendo precisamente esta onda electromagnética la que se incluye en el espectro. Las corrientes alternas, generadas de estas ondas, se aplican en electroterapia (efecto térmico y electroquímico), no utilizándose por lo general, sus campos electromagnéticos.

Las radiaciones de mayor longitud de onda, de extremadamente baja frecuencia, con longitudes de onda de miles de kilómetros, o ELF (del inglés Extremely Low Frequency), se aplican en la magnetoterapia (efecto electromagnético, predominando el magnético).

### **3.8. Efectos biológicos de los campos magnéticos.**

Interacción entre sistemas biológicos y campos electromagnéticos. Cuando un campo electromagnético interacciona con un tejido, una parte de la energía propagada por el campo es reflejada, una parte absorbida y una parte transmitida. Estas fracciones de energía dependen de la frecuencia del campo electromagnético, de la geometría del objeto biológico, de su permeabilidad eléctrica  $\epsilon$  de la conductibilidad eléctrica  $\delta$  y de la permeabilidad magnética  $\mu$ .

La  $\epsilon$  y la  $\delta$  de un tejido varían con la frecuencia del campo electromagnético aplicado:  $\delta$  aumenta al aumentar la frecuencia, mientras que  $\epsilon$  disminuye. Este comportamiento vale para todos los tejidos, dejando



bien establecido que para los tejidos de contenido lipídico y son más bajos por el menor contenido de agua y de iones.

El fenómeno más importante que sucede en un tejido biológico expuesto a un campo electromagnético es que surgen en él corrientes alternas (efectos magneto eléctricos). A baja frecuencia ( $\nu > 500\text{Hz}$ ) la membrana celular actúa de barrera aislante, y por tanto las corrientes inducidas por la exposición al campo electromagnético pasan sólo al líquido extracelular, esto explica la baja conductibilidad de los tejidos a bajas frecuencias. El aumento de la conductibilidad con la frecuencia se debe a una disminución de la capacidad de reactancia para la membrana celular, como consecuencia de cambios estructurales por la acción del campo electromagnético; este hecho lleva a una implicación del líquido intracelular en la conductibilidad total del tejido.

A nivel microscópico las interacciones pueden ser debidas también a orientaciones de moléculas, de radicales libres, de espín nuclear, cambios conformacionales y movimientos de iones bajo la acción de las fuerzas de Lorentz.

En la valoración de los efectos biológicos inducidos importantes, subrayar que éstos pueden ser debidos a efecto térmico, no térmico y mixto. A intensidad de  $1\text{-}100\text{ W/cm}^2$  se obtienen efectos no térmicos, a  $0.1\text{-}10\text{ mW/cm}^2$  se obtienen efectos térmicos con campos electromagnéticos en la zona UHF y VHF y efectos no térmicos a las frecuencias bajas y ELF, por encima de los  $10\text{mW/cm}^2$  se obtienen efectos netamente térmicos.

El calentamiento que se verifica en los tejidos depende de la energía absorbida y de la termorregulación. Hay que subrayar que a medida que disminuye la frecuencia:

- La componente magnética del campo electromagnético aumenta de importancia y a bajísima frecuencia tiene un registro fundamental.
- Aumenta la capacidad de penetración de las ondas electromagnéticas, que es directamente proporcional a la longitud de onda.

La literatura reciente ha individualizado diversos efectos que los campos electromagnéticos pueden inducir en los organismos vivos: la mayor parte son, a intensidades bajas, los campos ELF, de entidad modesta y que en apariencia no alteran sensiblemente el equilibrio biológico general de los organismos que han sido expuestos. Algunos de ellos interesan sin embargo sectores fundamentales del metabolismo celular y pueden por tanto justificar las acciones terapéuticas que a los campos electromagnéticos se les reconoce.



Los principales efectos biológicos que se les reconoce son: celulares, humorales, sobre el sistema nervioso central y sobre el crecimiento corporal.

Los campos magnéticos producen efectos a nivel bioquímico, celular, tisular y sistémico.

- A **nivel bioquímico** encontramos los siguientes efectos fundamentales:

- a) Desviación de las partículas con carga eléctrica en movimiento.
- b) Producción de corrientes inducidas, intra y extracelulares.
- c) Efecto piezoeléctrico sobre hueso y colágeno.
- d) Aumento de la solubilidad de distintas sustancias en agua.

- A **nivel celular**, los efectos indicados a nivel bioquímico determinan los siguientes:

- e) Estímulo general del metabolismo celular.
- f) Normalización del potencial de membrana alterado.

Por una parte, las corrientes inducidas producidas por el campo magnético producen un estímulo directo del trofismo celular, que se manifiesta por el estímulo en la síntesis del ATP, del AMPc, del ADN (favoreciendo la multiplicación celular), de la síntesis proteica y de la producción de prostaglandinas (efecto antiinflamatorio).

Por otra parte, hay un estímulo del flujo iónico a través de la membrana celular en especial de los iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Na}^{+}$  y  $\text{K}^{+}$ . Esta acción tiene gran importancia, cuando el (potencial de membrana está alterado.)

Las cifras normales del potencial de membrana se sitúan entre -60 a -90 mV. Este potencial se mantiene mediante un mecanismo activo en el que es fundamental la expulsión al exterior de la célula del ion  $\text{Na}^{+}$  que penetra en ella espontáneamente (bomba de sodio). En circunstancias patológicas, la bomba de sodio no actúa y el ion sodio queda (intracelular, con retención de agua (edema celular). En esta situación, los campos magnéticos pueden normalizar el potencial de membrana alterado. Tanto por el efecto de las corrientes inducidas a nivel intracelular, como por el efecto directo de los campos magnéticos sobre los iones sodio, éstos se movilizan hacia el exterior restableciendo la normalidad del potencial de membrana y reduciendo el edema celular que es uno de los primeros estadios de la inflamación a escala celular y cuya resolución supone también el primer paso en el tratamiento de la inflamación a escala celular, tisular y de órganos.

### ***Efectos a nivel de órganos y sistemas***

Desde el punto de vista tisular y orgánico, la magnetoterapia tiene una serie de acciones, de las cuales las más importantes son:





**a) Relajación muscular.** Los campos magnéticos tienen un importante efecto de relajación muscular sobre la fibra lisa y la estriada, que se supone debido a una disminución del tono simpático. Esta actuación sobre la fibra estriada supone un efecto relajante, o, en su caso, decontracturante, sobre el músculo esquelético. En su actuación sobre la fibra lisa, la magnetoterapia presenta un efecto relajante y antiespasmódico a diferentes niveles: espasmos digestivos de las vías biliares, de las vías urinarias, actuación sobre el asma.

**b) Vasodilatación.** Por el mismo mecanismo de relajación muscular, en este caso sobre la capa muscular lisa periarterial, la magnetoterapia produce una importante vasodilatación, demostrable por termografía, con dos consecuencias. De una parte, la hiperemia de la zona tratada. De otra, si se tratan zonas amplias del organismo, una hipotensión más o menos importante. La hiperemia local tiene los efectos terapéuticos ya conocidos de:

- Efecto trófico, por mayor aporte de nutrientes a la zona.
- Efecto antiinflamatorio, por mayor aporte de elementos de defensa bioquímicos o formes.
- Efecto de regulación circulatoria, tanto por producir vasodilatación arterial (en angioespasmos, Raynaud, etc.) como por estimular el retorno venoso.

**c) Aumento de la presión parcial del oxígeno en los tejidos.** Un efecto particular de los campos magnéticos, bien demostrado por Warhken, es el aumento de la capacidad de disolución del oxígeno atmosférico en el agua y, por tanto en el plasma sanguíneo. Con ello la presión parcial del oxígeno se puede incrementar notablemente. Este aumento local de la circulación conduce a un mayor aporte de oxígeno tanto a órganos internos como a zonas distales mejorando su troficidad.

**d) Efecto sobre el metabolismo del calcio en hueso y sobre el colágeno.** Un efecto importante de la magnetoterapia es su capacidad de estímulo trófico del hueso y del colágeno, efecto ligado a la producción local de corrientes de muy débil intensidad por el mecanismo de la piezoelectricidad. Ya comentamos la observación de la osteoporosis producida en ausencia de campos magnéticos.

A la inversa, la magnetoterapia ayuda en la fijación del calcio en el hueso, por lo que se emplea en osteoporosis general o localizada, síndrome de Sudeck, retardos de osificación y pseudoartrosis. Los campos magnéticos estimulan la producción de colágeno, lo cual es de interés tanto en los procesos de cicatrización como para prevención del envejecimiento de la piel.



**e) Efecto analgésico.** La magnetoterapia produce un discreto efecto analgésico, derivado tanto de una acción directa a nivel de las terminaciones nerviosas como de su actuación sobre el mecanismo productor del dolor (inflamación). En clínica, este efecto no es de rápida aparición, pero es mantenido y persistente.

**f) Efecto de relajación orgánica generalizada.** Finalmente, la magnetoterapia posee un efecto generalizado de relajación y sedación, muy útil para el tratamiento del estrés y de las afecciones de él derivadas. Este efecto se ha supuesto debido, por una parte, al aumento en la producción de endorfinas, y por otra, al hecho de su actuación de relajación muscular e hipotensora, puesto que siempre que se asocian estos dos efectos hay un marcado efecto relajante general sobre el organismo. De hecho, la magnetoterapia es una buena técnica para combatir el estrés y los trastornos que conlleva: intranquilidad, insomnio, cefaleas, taquicardias emocionales y otros cuadros de origen tensional.



## **4. Acciones Biológicas de los Campos Magnéticos.**

Las acciones biológicas de los campos magnéticos se suelen dividir, a efecto de su estudio, en acciones primarias y secundarias. Las primeras se deben al efecto magnetomecánico y de inducción magnetoeléctrica, mientras que las secundarias más importantes, o comúnmente aceptadas, son las debidas al efecto térmico y al de coherencia o resonancia.

### **4.1. Efectos Magnetomecánicos.**

Los efectos magnetomecánicos se consideran que son especialmente importantes en presencia de campos magnéticos estáticos. Estos efectos se deben a la interacción magnética entre el campo externo y el material biológico. Según sea el material biológico ferromagnético, paramagnético o diamagnético, se va a producir una interacción más o menos intensa que llevará consigo la presencia de fenómenos de translación y rotación de las moléculas. La rotación u orientación de las moléculas se producirá al ponerse en paralelo el momento magnético molecular, bien permanentemente o bien inducido, con el campo externo. La translación se producirá si el campo magnético externo no es homogéneo. A continuación se verá los distintos efectos magnetomecánicos en los diversos tipos de materiales biológicos.

#### **- Efectos magnetomecánicos en materiales ferromagnéticos**

Actualmente es un hecho bien conocido que diversos animales tienen la capacidad de orientarse en presencia del campo magnético terrestre. Estudios realizados sobre la bacteria *Aquaspirillum magnetotactium*, que tiene la capacidad de orientarse en un campo magnético externo, han llevado a la conclusión de que en el protoplasma de esta bacteria existen pequeñas partículas de magnetita o piedra imán que son las responsables de la orientación de dichas bacterias. Dicha magnetita se sintetiza en el protoplasma a partir de complejos de Fe orgánicos y solubles. De esta forma se habla de magnetosoma para referirse a las finas partículas de magnetita existentes en el protoplasma. La existencia del magnetosoma no se restringe solamente a las bacterias, sino que se acepta en todos los animales que son capaces de orientarse en el campo magnético terrestre. De esta forma el magnetosoma se ha encontrado en una clase de abeja y en algunos peces elasmobranchios, en los que se ha encontrado que variaciones en el campo magnético reducen respuestas en las neuronas del área acústico - lateral.

La presencia o no de magnetosoma en el hombre es un tema que se encuentra en un estado de controversia.

Aparte de los efectos magnetomecánicos sobre el magnetosoma, es evidente que en el hombre se pueden producir efectos magnetomecánicos indeseables sobre materiales ferromagnéticos introducidos en el organismo humano mediante intervenciones quirúrgicas. Este es el caso de los clips



metálicos usados para suturar, los cuales pueden ser arrancados por la presencia de campos magnéticos lo suficientemente intensos.

### **- Efectos magnetomecánicos en materiales paramagnéticos**

Existen experiencias en la actualidad que llevan a considerar que los campos magnéticos estáticos actúan como protectores radiológicos, debido a su interacción con el oxígeno y los radicales libres que son paramagnéticos. Se considera que el oxígeno potencia la creación de radicales libres o hacen que los radicales libres entren en reacciones en cadena que producen las lesiones. Otra teoría indica que los cambios inducidos por las radiaciones ionizantes son reversibles en ausencia de oxígeno. La actuación como protectores radiológicos de los campos magnéticos se basan en la teoría de la hipoxia ficticia. Según esta teoría y al ser el oxígeno debido al campo magnético externo, este gradiente de concentración "fija" al oxígeno y hace que este no pueda difundirse adecuadamente. De esta forma se llega a una situación en la que hay oxígeno pero no se puede utilizar. Al estar el oxígeno bloqueado la producción de radicales libres disminuye. Ocurre que los radicales libres son a su vez paramagnéticos, por lo que quedarán bloqueados por un proceso similar. No solo ocurre esto sino que al ser los citocromos de la cadena respiratoria y la hemoglobina sustancias paramagnéticas también puede quedar bloqueado su transporte por los campos magnéticos estáticos. Todo este cúmulo de hechos lleva a un estado de depresión en la respiración celular, lo que junto con el boqueo de oxígeno y de los radicales libres puede explicar el efecto protector y antiblastico de los campos magnéticos estáticos.

### **- Efectos magnetoestáticos en materiales diamagnéticos**

Las macromoléculas biológicas diamagnéticas, cuya susceptibilidad magnética es anisótropa, pueden orientarse en presencia de un campo magnético externo.

Este fenómeno de orientación es fuertemente cooperativo, pues el grado de orientación aumenta cuando en vez de una hay  $N$  moléculas formando un agregado molecular. De hecho se ha observado una alineación casi total con el campo magnético externo de los cloroplastos, bastones de la retina y fibras musculares. Efectos cooperativos como los anteriormente citados se supone que son la causa de los efectos del campo magnético sobre las reacciones enzimáticas.

## **4.2. Efecto Magnetoeléctrico.**

Una variación en el campo eléctrico induce una variación en el campo magnético y viceversa. Fue Faraday quien primero describió el hecho de que una variación en el campo magnético y por tanto en el flujo magnético induce un campo eléctrico. Si el medio en consideración es un medio conductor, el campo eléctrico inducido pondrá en marcha una corriente eléctrica. Conviene recordar aquí, que en los medios biológicos los



portadores de carga y por tanto los portadores de la corriente eléctrica son los iones. Es pues de esperar que bajo la acción de campos magnéticos variables se produzcan migraciones iónicas con los correspondientes efectos a nivel de membrana que esto conlleva. No obstante, no hay que creer que todos los campos magnéticos pulsantes se deben a las corrientes eléctricas inducidas, sino que también aquellos fenómenos magnetomecánicos que necesiten de un orientamiento oscilante jugarán un papel importante.

### **4.3. Efectos Secundarios.**

#### **- Efecto térmico**

Se ha encontrado un aumento de la temperatura superficial del organismo humano, tras someter a este a la acción de los campos magnéticos variables de baja frecuencia. No obstante, no se ha encontrado calentamiento en profundidad a nivel intraarticular. El origen de este calentamiento está poco claro. Podría pensarse que se debe al efecto Joule de la corriente inducida, pero dada la baja frecuencia que se utiliza 10-50 Hz, la intensidad de la corriente inducida no es suficiente como para aumentar la temperatura más que unas décimas de grado. Otro posible efecto que conlleve la subida de la temperatura es la existencia de tensiones debida a las fuerzas magnetomecánicas oscilantes. El efecto vasodilatador descrito por varios autores podría ser el causante de la hipertermia citada. Según estas hipótesis el aumento de temperatura superficial no se debe al efecto Joule de las corriente inducidas, sino a una vasodilatación periférica, lo que a su vez explicaría la carencia de hipotermia a nivel intraarticular.

#### **- Efecto de coherencia o resonancia**

Aunque existe controversia acerca de la existencia de este efecto e incluso tiene sus detractores, se va a exponer, por último, el efecto de coherencia de los campos magnéticos pulsantes de baja frecuencia. Este efectos se basa en las teorías de Popp, según las cuales las células que componen un tejido intercambian información no sólo mediante la liberación de sustancias bioquímicas y la puesta en marcha de corrientes eléctricas de naturaleza iónica, sino mediante la emisión de una radiación electromagnética de una intensidad muy débil. Según Popp esta radiación es coherente, con la luz láser y puede, por tanto, ser un vehículo de la transmisión de información entre células. La frecuencia de esta radiación puede variar entre unos pocos hertzios y 1015 Hz. Cuando un sistema vibra en forma natural, con una cierto frecuencia, es posible excitarlo desde el exterior con una señal que tenga la misma frecuencia que la natural vibración del sistema. Consiguiéndose así un fenómeno de resonancia que pondría en marcha la bioregulación de dichas células. Variando la frecuencia de los campos magnéticos se podrían bioregular distintas poblaciones celulares.



A continuación se presenta un diagrama con la acción de los campos magnéticos pulsantes sobre diferentes parámetros:

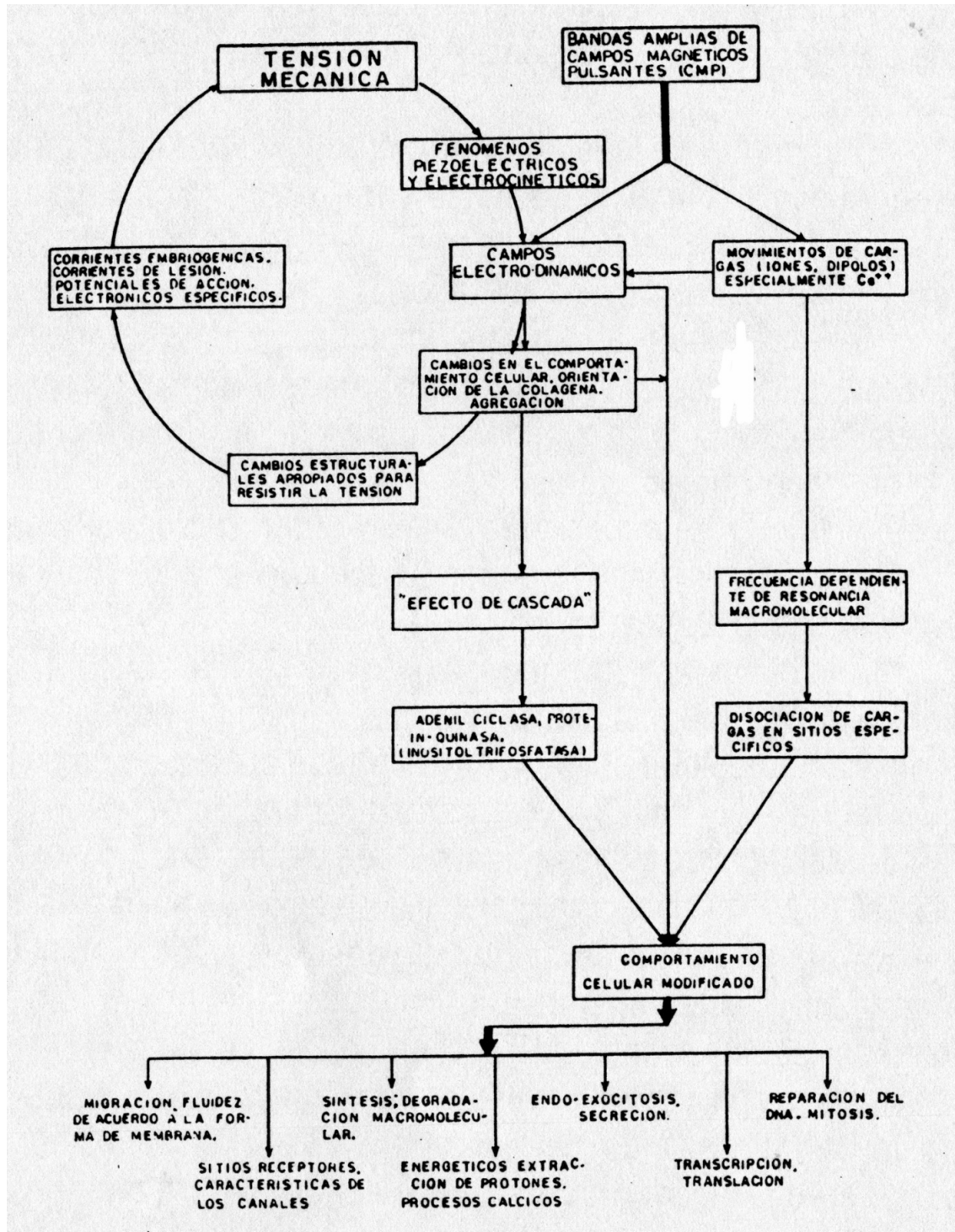


Figura 4.1. Acción de los campos magnéticos.



## **5. Magnetoterapia: Técnicas de aplicación clínica.**

### **5.1. Características de los campos magnéticos empleados en terapia.**

Los campos magnéticos se crean mediante el paso de una intensidad eléctrica a través de una bobina o solenoide. De forma que controlando la intensidad eléctrica que pasa por el solenoide podemos establecer las características del campo magnético que se genera, ya que la intensidad es proporcional al campo magnético creado.

La intensidad del campo magnético que se usa en terapia es muy baja. No se suele exceder de 350 Gauss, aunque la cifra de 100 Gauss es más usual (el aparato diseñado empleando forma de onda cuadrada establecerá un campo de 75 Gauss en el interior del solenoide, pudiendo disminuir su valor hasta 10 Gauss modificando la resistencia en serie con la bobina, como veremos en el apartado 10.3.). Recuérdese que el Tesla = 10.000 Gauss y que el campo magnético terrestre es del orden de 0.5-1 Gauss.

Los campos magnéticos empleados son pulsantes, esto es: se repiten a intervalos iguales. El periodo es el tiempo que tardan en repetirse los impulsos y la frecuencia es el inverso del periodo. Cuando el periodo se mide en segundos, la frecuencia se mide en Hertzios (Hz). Mientras que en la electromagnetoterapia se emplean frecuencias elevada, desde los MHz hasta los GHz, en magnetoterapia se utilizan bajas frecuencias, de 10 a 1000 Hz. La corriente inducida por el efecto Faraday depende de la rapidez de la variación del campo magnético, y por tanto de la frecuencia. De esta forma en la electromagnetoterapia se producirán corrientes inducidas lo suficientemente altas como para inducir un calentamiento por efecto Joule. En la magnetoterapia y debido a la baja frecuencia que se emplea no se producirán corrientes inducidas importantes. Con lo que en principio, la magnetoterapia será un tratamiento atérmico.

La polaridad del campo magnético puede ser positiva o negativa, dependiendo del signo de la corriente eléctrica que atraviese el solenoide. Esta polaridad puede por tanto controlarse por el magnetoterapeuta.

La forma de la onda admite un grado de variación, así se pueden usar ondas senoidales, semisenoidales, cuadradas, cuadradas trapezoidales, triangulares... En éste proyecto la forma de onda resulta cuadrada, a diferencia de lo más usual, que resulta ser emplear onda senoidal.

Como ya ha quedado indicado, la producción de campos magnéticos se realiza mediante el paso de una intensidad eléctrica por un solenoide.

Los problemas que se plantean son:





a) Falta de uniformidad en el campo magnético en el interior del solenoide (ya el valor de intensidad magnética en el centro del solenoide difiere conforme nos alejamos del mismo)

b) Calentamiento del solenoide por efecto Joule

Si el campo magnético es variable producirá además una fuerza electromotriz inducida en los extremos del solenoide que hará que la intensidad y el voltaje no estén en fase, lo que generará ciertos problemas técnicos.

La solución que se ha elegido en el presente proyecto es construir una bobina de 21.1 cm de diámetro.

## **5.2. Magnetoterapia de alta y baja frecuencia.**

Los resultados de una terapia dependen de diversas condiciones, todas más o menos importantes, que pueden ser así indicadas:

- Diagnóstico de la enfermedad
- Elección de la terapia
- Aplicación de la terapia

El diagnóstico de la enfermedad a tratar es fundamental, así como la elección terapéutica, como por un juicio sobre las posibilidades de curación y mejoramiento.

Las patologías que hasta ahora han sido objeto de tratamiento con C.M. son aquellas óseas, osteoarticulares, músculo tendinosas, cutáneas y nerviosas.

La elección de la terapia debe ser específica por la patología a tratar y, si la elección va encaminada por la magnetoterapia, esta puede ser aplicada sola o en asociación a otros tratamientos. Puesto que el término magnetoterapia demuestra por convención tanto las altas frecuencias (HF) como las bajas frecuencias (LF) es necesario hacer antes que nada una diferenciación entre ambas.

La magnetoterapia a altas frecuencias consiente aplicaciones locales, poco profundas, puede manifestarse un modesto efecto térmico, puede ser utilizada en cualquier parte.

La magnetoterapia a baja frecuencia demuestra alta penetración, es atérmica, pero necesita disponibilidad de ambulatorio con un instrumento no movable.

Una y otra pueden ser utilizadas con técnicas y modalidades de aplicaciones diversas.



Por lo que concierne las HF, se puede variar en relación a los aparatos la proporción entre fase ON y OFF del ciclo y el número de los ciclos/sec. Se puede variar también la intensidad de inducción. Los aparatos de pequeñas dimensiones, portátiles, conectados al paciente con antenas o láminas; tienen escasa potencia, determinan un campo eléctrico prevalente sobre el campo magnético.

Los aparatos para LF están constituidos con conjuntos fijos o semifijos y cuyos componentes son una tabla de mando y una cama sobre la que ruedan uno o dos solenoides. Estos son recorridos en sus roscas de cobre por una corriente que induce al interior un campo magnético que prevalece sobre el eléctrico. El campo magnético tiene una dirección que está marcada con una flecha sobre el solenoide.

Si se usan dos solenoides, estos pueden inducir o un campo magnético vasto con posibilidad de abarcar casi todo el cuerpo (total body) o dos campos magnéticos opuestos (reverse total body).

Variando el tipo de corriente que suministra energía se obtienen campos magnéticos variadamente modulados según los siguientes parámetros:

**Intensidad del campo magnético:** Medible en Gauss y variable en un rango entre 0 y 100. Nuestro aparato establecerá un campo de 75 gauss, pudiendo disminuir como ya veremos, su valor; modificando las características de la bobina (resistencia en serie). El término 100 gauss está bien lejos de las intensidades que pueden producir acciones dañinas. La intensidad puede ser modulada empezando el tratamiento con una dosis baja que va siendo aumentada gradualmente. Se puede notar al principio del tratamiento un aumento de las molestias. Hay que reducir intensidad y frecuencia. Puede ser un hecho positivo.

**Tipo de onda:** La posibilidad de elección concierne la forma que puede ser: Sinusoidal enderezada, semisinusoidal o cuadrada.

**Frecuencia:** Es variable de 0.75 a 100 Hz para la onda cuadrada y de 50 a 100 Hz para la sinusoidal.

**Duty cycle:** La onda cuadrada puede ocupar del 10 al 50% de cada ciclo. Esto se obtiene accionando al mando apropiado. Para frecuencias de 50-100 Hz si el duty cycle es del 10-20% no se logra, por inercia del aparato, la intensidad del campo escogido.

**Modalidad de suministro:** Las ondas electromagnéticas pueden ser suministradas de forma constante o interrumpidas rítmicamente. Puede ser preestablecida una sucesión rítmica de los varios tipos de onda.

**Total body:** La utilización de dos solenoides está indicada en las patologías polidistrectuales o dismetabólicas.



**Reverse total body:** Ideado para el tratamiento de los retrasos de consolidación, crea dos campos de direcciones opuestas sobre el foco de fractura obteniéndose a este nivel el máximo gradiente.

**Duración de la exposición:** El aparato está dotado de un sistema temporizado que consiente de regular el sistema de exposición. Generalmente entre 20 y 30 minutos (nuestro aparato permitirá tratamientos de hasta 2 horas). Durante la exposición pueden ser variados los parámetros a elección del operador. Para los retrasos de consolidación los tiempos pueden ser redoblados.

**Duración de los ciclos:** Generalmente el número de sesiones es de 10-15. Se supera abundantemente este límite para los retrasos de consolidación. Los tratamientos pueden ser seguidos todos los días o días alternos.

**Repetición de los ciclos:** Los ciclos van repetidos en las formas crónicas por lo menos dos veces al año.

Se señalan algunas condiciones "de contorno" que se observan para mejorar la posibilidad de un resultado favorable. La indicación la puede dar el médico de familia o el especialista y puede ser solicitada simplemente con el término magnetoterapia.

La elección del tipo de campo magnético, frecuencia, intensidad, forma de onda, continuidad o discontinuidad de las ondas, secuencia de los impulsos... debe ser manejada por el terapeuta con buena preparación y conocimiento de los aparatos y de las posibilidades terapéuticas de estos. Este valorará después periódicamente los efectos del tratamiento y puede intervenir después del inicio de la terapia y modificar los parámetros en relación a variaciones del cuadro clínico.

El paciente difícilmente advierte la sensación de estar en un campo magnético (salvo algunos que suelen adormecerse o que con las ondas cuadradas advierten la sensación de sacudidas). Por lo tanto conviene resaltar la presencia real del campo magnético introduciendo en el campo un pequeño imán o un aparato que evidencie con una imagen luminosa la presencia de corrientes eléctricas.

Esto es válido por lo menos por tres razones:

- El paciente advierte que existe el campo magnético.
- El médico sabe que la máquina suministra energía.
- El técnico se rinde cuenta que no debe exponerse demasiado en el campo magnético.

El ambiente en el que se va a desarrollar la terapia debe ser acogedor y relajante y debe estar bien aireado. El personal que trabaje en el debe ser ordenado y amable.



El paciente debe observar horarios fijos, llegar un poco antes del horario previsto, permanecer algún tiempo después del fin de la terapia. Debe señalarse la dificultad para algunos pacientes para estar situados en el interior del solenoide. Esto es evidente en los politraumatizados, en los tetraplégicos, en los pacientes desorientados, en los claustrofóbicos.... Puede resultar difícil la utilización de LF a nivel deportivo en cuanto:

- El aparato no es fácilmente transportable.
- Puede ser utilizado contemporáneamente por una o dos personas.
- Por la preparación de la máquina (media hora) y por la permanente ocupación de la misma es difícil iniciar precozmente (que sería lo ideal) la terapia después de contusiones o distensiones.

Condiciones atmosféricas especialmente desfavorables, tales como fríos intensos o fuertes nevadas, inducen a suspender por uno o dos días la terapia.

No hay contraindicaciones a la asociación con otras terapias, como TENS, biofeedback, láser, acupuntura, reflexoterapia o fármacos como los FANS en la fase aguda etc.

### **5.3. Aplicaciones Clínicas de los C.M. sobre Órganos en Movimiento.**

Las patologías que afectan al aparato locomotor corresponden al médico de familia y solo algunas veces al especialista, cuando el paciente no logra tolerar más el dolor o manifiesta impotencia funcional de una o varias articulaciones. Con excepción del atleta que recurre por necesidad de trabajo al especialista aunque solo sea por patologías modestas.

Aquellas que más frecuentemente van dirigidas al especialista son las algias localizadas o polidístritas, agudas o reincidentes, no específicas.

A menudo no se identifica una causa orgánica en el determinismo de estas patologías pero con más frecuencia es reconocible una causa biomecánica que determina que determina y mantiene la irritación de la articulación o del músculo. El tratamiento con fármacos antidolorosos a menudo obtiene resultados nocivos, ya que la supresión del dolor aumenta el daño que puede convertirse de funcional en orgánico.

Otra patología importante de los órganos de movimiento es la artrosis, localizada o polidístrita, con o sin osteoporosis, que llega al especialista por la misma razón: el dolor.

Las afecciones músculo tendinosas interesan sectores localizados que han estado sometidos a una actividad demasiado intensa. Presentan flogosis, dolor... y es esta última razón la que demanda diagnóstico y tratamiento.



La rehabilitación post-operatoria y post-traumática, especialmente cuando interesan a la rodilla, permite un componente álgido solicitando continuamente del movimiento y apoyo.

Han sido muchos los intentos para hacer que el atleta intervenido o traumatizado conserve activas y en función las propias fibras musculares, que tiendan, en estado de reposo, a atrofiarse. La movilización precoz, las corrientes eléctricas.... han obtenido resultados variables e inconstantes. De cara a estas condiciones expuestas, debe seguirse una atenta valoración de la situación clínica, explorando y asignando una puntuación a los siguientes parámetros:

- Dolor subjetivo.
- Dolor objetivo.
- Excursión articular.
- Tumefacción articular.

Estos valores servirán para medir los resultados al final de la terapia.

Se valorarán en fin la situación psiquiátrica del paciente, su personalidad, y su modo de afrontar la enfermedad y la terapia.

En la sintomatología investigada prevalece como se ha dicho el componente dolor en sus formas objetivas y subjetivas; pero se ha dicho que la magnetoterapia no cura sino en una medida mínima el dolor. El efecto de los campos magnéticos se manifiesta con un efecto de reforma de la función celular y de las membranas celulares y mitocondriales, con reequilibrio de los cambios electrolíticos e hídricos; el consumo de oxígeno por parte de la célula mejora; se nota una activación de las enzimas y actividad bloqueante y radicales libres producidos en la flogosis.

Se tiene una modesta estimulación del sistema endorfinico con realzamiento del principio al dolor. Este es atenuado también por la liberación de esteroides naturales obtenibles con campos magnéticos intermitentes a nivel torax abdominal.

La utilización del total-body ha conseguido verificar situaciones nuevas. Se ha verificado que tratando una enfermedad osteoarticular, el paciente recaba un modesto beneficio local y ve desaparecer otros disturbios o advierte un sentido de bienestar y al mismo tiempo una mayor capacidad de tolerancia.

Situaciones igualmente favorables se obtienen del atleta tratado por patología osteoarticular o muscular con campos magnéticos. Demuestra a la reanudación de la actividad agonística una óptima capacidad de recuperación casi como si no hubiera sufrido una pausa forzada. El tratamiento de las formas osteoarticulares, musculares o tendinas precisan una cuidada elección del campo magnético.



La elección del tipo de campo magnético (HF o LF) depende de la superficialidad o profundidad de las molestias.

La intensidad va regulada partiendo de valores bajos (15-20 gauss a 50 Hz hasta 30-40 gauss a 100Hz). Va reducida si un solenoide va situado a la altura del cuello o la cabeza.

La frecuencia de 50 Hz con onda semisinusoidal es atérmica. También la sucesión de trenes a 50 y 100 Hz resulta atérmica.

La forma de onda puede ser sinusoidal en varias patologías pero debe ser cuadrada si se evidencia osteoporosis.

La duración de cada sesión es de media hora en las formas agudas y continua por dos-tres veces después de la desaparición de la sintomatología dolorosa y funcional. Para las formas crónicas reincidentes 30 minutos en 15 sesiones por lo menos dos o tres veces al año. Para la osteoporosis sesiones más prolongadas (30-60 minutos), ciclos de 20-30 días, repetidos tres o cuatro veces al año.

El total body viene utilizado cada vez que es posible, siempre en la osteoporosis.

No está contraindicado, al contrario resulta útil la asociación con otras terapias de efecto local como TENS, láser, mesoterapia. Algunos acupunctores someten a sus pacientes, a los que han enfilado las agujas, al campo magnético para acrecentar el efecto.

Va bien también la asociación con fármacos como los antiinflamatorios, antioxidantes, anabolizantes, osteotróficos, vitamínicos.

Por lo que concierne a los resultados de la terapia, la patología de la médula espinal es la que conlleva mejores ventajas a la exposición del campo magnético, ya sea en cuanto al cuello como a la parte dorso-lumbar.

Es buena también la respuesta en la patología de caderas, de rodilla y de pie. Los resultados menos válidos son los obtenidos en la patología de la espalda.

Los campos magnéticos también están siendo utilizados para la curación de las fracturas. Sin embargo, estos no son suficientes por si solos para llevar a cabo una curación de la fractura. Otros factores juegan un papel igualmente importante:

- Entidad de la lesión.
- Equilibrio metabólico del hueso.
- Situación circulatoria, especialmente local.
- Eventuales lesiones de los tejidos circundantes.



- Factores extraños.
- Calidad de la inmovilización.
- Estado del sistema nervioso central.
- Infecciones locales.
- Efecto placebo.

Se revelan algunas consideraciones comunes que pueden ser así resumidas:

- Los campos magnéticos deben poseer una intensidad óptima comprendida entre 10 y 80 Gauss.
- La banda óptima de frecuencia va de 20 a 100 Hz.
- Los tiempos de aplicación varían de una hora a 12-16 horas al día, por una duración de 6 semanas a algunos meses.

Iniciando el tratamiento enseguida se pueden ver excelentes resultados.

Es necesario, al iniciar el tratamiento, seguir el proceso evolutivo de formación del callo óseo: la primera semana vienen repartidos campos magnéticos de onda cuadrada a frecuencia de 20-50 Hz, breve duty cycle (10%), intensidad 30-40 Gauss, evitando así el efecto térmico.

Para la segunda y tercera semana el duty cycle puede ser prolongado hasta el 50%, las frecuencias pueden ser variadas con la técnica del barrido, la intensidad de 30-40 Gauss pasan en la cuarta y quinta semana hasta 60-70 Gauss para cada uno de los dos solenoides.

El tiempo de aplicación será de 30 a 60 minutos al día.

Es necesario un riguroso control de las fases de tratamiento de la fractura.

Conclusiones:

- Los campos magnéticos de baja intensidad y frecuencia producen en nuestro organismo numerosos efectos biofísicos a diversos niveles organizativos de la materia viva.
- De particular interés son los siguientes bioefectos:
  - Inducción de un efecto piezoeléctrico en las estructuras conectivas.





- Orientación estructural del colágeno y del hueso neoformado con acentuación del proceso de deposición del calcio.
  - Mejoría de las condiciones circulatorias locales y de la presión del oxígeno.
  - Mejoría del proceso reparador a nivel de los tejidos blandos.
  - Mejoría del estado general: modulación del sistema inmunitario y disminución del crecimiento bacterico.
- Para que esto se verifique es necesario conducir el tratamiento según los siguientes criterios:
- Dosificación adecuada.
  - Usar bien intensidad y frecuencia.
  - Elegir entre las diferentes clases de onda (para fractura preferiblemente onda cuadrada).
  - Valorar la reactividad individual (condiciones generales físicas y psíquicas del paciente).

Como se puede suponer, la aplicación de campos magnéticos ha dado buenos resultados (aparte de la osteoporosis, fracturas...) en otras patologías como:

- Llagas, llagas entumecidas, quemaduras.
- Flogosis de los senos paranasales, amigdalitis, laringitis, bronquitis, asma.
- Gastritis, úlcera, colitis.
- Cefalea.
- Envejecimiento.

Los campos magnéticos pueden encontrar amplios sectores de aplicación en cirugía y ginecología.

Es difícil convencer al ostetrico y cirujano, extremadamente seguros de sus propias técnicas operativas, a recurrir a terapias alternativas que precisen de estudio y experimentación.

Para la cirugía los campos magnéticos pueden ser útiles en las siguientes situaciones:

- Después de hepatectomia parcial.
- Protección post-operatoria de las suturas intestinales.



- Prevención de queloides.
- Prevención de edema arto-superior después de mastectomía.
- Reequilibrio de funciones alteradas de la enfermedad.

Es necesario advertir que existe la posibilidad de procesos supurativos, que son causados, debería decirse a "fin de bien", del campo magnético que disminuye la agresividad de algunos grupos de bacterias y mejora las defensas orgánicas favoreciendo la eliminación del material extraño.

Por lo que concierne a la ginecología, deberían ser indicaciones en el tratamiento de:

- Flogosis de los tubos.
- Prevención post-operatoria de adherencias.
- Anastomosis

#### **5.4. Precauciones y Efectos Colaterales.**

La FDA (Food and Drug Administration, EEUU) ha concedido el permiso de utilización de la magnetoterapia solo para el tratamiento de los retrasos de consolidación y ahora está permitiendo la experimentación para osteoporosis y otras patologías. Se cree oportuno resaltar una serie de precauciones a adoptar, aunque algunas pueden parecer superfluas:

- Mujeres embarazadas, no deben someterse a magnetoterapia los primeros meses de embarazo, cuando la multiplicación celular está en su fase más intensa. Aunque si no se han demostrado efectos negativos es mejor mantener una regla prudencial.
- Portadores de marcapasos: el campo magnético a baja intensidad y frecuencia no deberían producir daños al marcapasos. Se sabe en cambio que la RMN puede inferir en el marcapasos, llegar a bloquearlo y hacerlo cambiar y rodar de su posición. Aunque excluyendo estos inconvenientes para las bajas frecuencias e intensidades, también en este caso se cree oportuno no someter a los portadores de marcapasos a magnetoterapia.
- Portadores de aparatos acústicos; deben quitárselos antes de someterse a terapia.
- TBC activos; no se conocen los efectos de los campos magnéticos en el bacilo de Koch; solo la literatura, sin explicar las causas, indica de no someter a campos magnéticos los sujetos con TBC.
- Infecciones micóticas; también aquí vale todo lo que se reseña arriba; no se aconseja el uso en la micosis que interesan amplias zonas cutáneas.



- Pacientes con temperatura elevada; la magnetoterapia acelera el círculo y puede por lo tanto provocar un ulterior aumento térmico. El paciente con fiebre no va por lo tanto expuesto al campo magnético y la aparición de fiebre durante el tratamiento debe aconsejar la suspensión de las sesiones y a revalorizar la situación clínica.

- Pacientes hemorrágicos; la utilización de ondas cuadradas a baja frecuencia podría empeorar el derrame. Para otras ondas (como la sinusoidal) el problema parece no existir. La prudencia sugiere de todas formas de no hacer uso de campos magnéticos en los primeros dos o tres días después de una hemorragia.

- Periodo menstrual; se aconseja suspender el tratamiento durante todo el periodo.

- Testículo y ojo no tienen poder de termoregulación; podrían padecer daños de aparatos que inducen efectos moderadamente térmicos.

- Para las portadoras de espiral, existe el problema que, tratándose de cuerpo extraño, si está mal colocado o mal tolerado podría provocar un intento de expulsión por parte del organismo. No existen garantías de efectos seguros anticonceptivos durante el periodo de tratamiento.

- Los pacientes con medios de síntesis pueden ser sometidos a campos magnéticos; es necesario sin embargo observar algunas reglas. Para los clavos endomilares y las prótesis no existen problemas. Para placas y distractores externos hay que seguir controles radiológicos mensuales para identificar situaciones patológicas, en correspondencia a clavos y tuercas; ya que estos son recorridos por corrientes inducidas, podrían crearse polos que supliendo al cátodo o ánodo estimulan el depósito o el reabsorbimiento del calcio. Si el medio de síntesis no es tolerado, el campo magnético puede favorecer la eliminación.

- El paciente puede acceder vestido al campo magnético a baja frecuencia; sin embargo debe dejar fuera relojes, tarjetas de crédito, cadenas y otros objetos metálicos.

- Se reseña en fin la dificultad de situar en el interior del solenoide a algunos pacientes con patologías particulares; por ejemplo el cifocito grave, el tetra y parapléjico, el traumatizado cránico desorientado, el claustrofóbico. Se desaconseja el uso a los epilépticos, esquizofrénicos, sujetos histéricos y particularmente ansiosos.

- El aparato para magnetoterapia LF debería estar aislado de los otros.

Los efectos colaterales relevados han sido ya señalados en las patologías descritas y tienen siempre aspecto positivo:

Van así señalados:

- Somnolencia; algunos pacientes se adormecen durante el tratamiento.



- Mareos; se manifiestan cuando el paciente sale del solenoide.
- Sabor metálico; se advierte en la boca cuando la intensidad del campo es elevada.
- Cefalea; puede ser más intensa e incluso insoportable después de la exposición a onda cuadrada de elevada intensidad y baja frecuencia. Sucesivamente se ha obtenido una remisión completa de la cefalea.
- Se puede verificar acentuación del dolor del sector tratado y la aparición del mismo en un sector que aparecía indemne; también este efecto es positivo.
- Las formas inflamatorias de gérmenes, especialmente crónicas, pueden tratar de expulsar un cuerpo extraño o así convertido por activación de los procesos inmunitarios y de fagocitosis.
- Se ha relevado la desaparición del graso periarticular en algunas formas de gonartrosis.

Se tiene una casi absoluta tranquilidad en la utilización de campos magnéticos en terapia. No obstante no se debe abandonar la prudencia en cuanto a la extensión de la utilización que no ha llegado todavía al máximo y podrían siempre manifestarse problemas que hasta ahora no se han encontrado.

Es útil por tanto que la inocuidad de los medios, lo mismo terapéuticos que diagnósticos, sea ulteriormente sufragada de otras investigaciones experimentales que consientan de definir absolutamente las características de seguridad.

Será este uno de los deberes de una nueva ciencia, la magnetobiología, que está abriendo nuevas fronteras a la biología, a la bioingeniería y a la radioingeniería.



## 6. Tratamientos de enfermedades mediante magnetoterapia.

Durante los últimos veinte años, de un modo más o menos empírico, la magnetoterapia ha venido aplicándose en casi todos los campos de la medicina.

Aunque todavía es demasiado pronto para hacer un balance final de resultados de una terapia, que sin duda alguna aún se encuentra en su infancia, sí que ya aparecen como muy claras algunas de sus principales acciones terapéuticas. Así, los campos magnéticos, en especial los **pulsantes**, parecen desempeñar un papel importante en **funciones analgésicas, antiedemas, antiinflamatorias, mejorantes de la macro y la microcirculación sanguínea, regeneradoras óseas, regeneradoras de tejidos blandos y moduladoras de la actividad de ciertas enzimas**; por todo ello resulta interesante estudiar algunos de los últimos avances.

### 6.1. Últimos avances en magnetoterapia.

En el Congreso de la Asociación de Bioelectromagnetismo Europeo (EBEA) celebrado en Zagreb a finales de 1998, se volvió a revisar el estado del arte en lo referente a la magnetoterapia, y así, Pilla hace una reflexión muy importante sobre los efectos de las frecuencias que se están aplicando. Dentro de esta reflexión es de destacar:

- a) Que la respuesta clínica a los campos magnéticos pulsantes (PEMF) no suele ser inmediata, sino que requiere de un tratamiento diario durante varios meses, especialmente en el caso de las fracturas óseas con soldadura retardada, en las que se logra reducir el tiempo. Hay que recordar que estos PEMF han sido hasta ahora los más comúnmente utilizados en magnetoterapia, ya que presentan una densidad espectral mayor en el rango más bajo de frecuencias.
- b) Que a diferencia de los PEMF, que inducen campos eléctricos en el rango de mV/cm con frecuencias por debajo de los 5KHz, las señales pulsantes de radiofrecuencia (PRF) inducen campos eléctricos en el rango de V/cm y con frecuencias mucho mayores. Esto significa que las señales de los PRF tienen componentes de frecuencia que se extienden sobre y de manera más amplia que los de los PEMF. Ello trae consigo que las aplicaciones clínicas de los PRF sean más efectivas que las de los PEMF para la reducción del dolor y del edema. Hay que recordar que la inflamación del tejido que acompaña a la mayoría de los traumatismos es esencial para el proceso de soldadura del hueso roto. Sin embargo, a veces la respuesta defensiva del



- c) cuerpo humano es excesiva y el edema resultante es tan grande que retrasa la soldadura y genera dolor. En estos casos, sin lugar a ninguna duda, un tratamiento electromagnético efectivo demanda una respuesta fisiológicamente significativa en tan sólo unas horas o días. En estos casos el recurso a PRF resulta obligado.

La utilización de PRF no térmicos, sin embargo, no es nueva. Antes del descubrimiento de los antibióticos ya habían comenzado a aplicarse como tratamientos antiinfecciosos, y desde entonces, el modo más usual de aplicación consistía en treinta minutos de exposición diaria durante varias semanas. A partir de ahí se han investigado los resultados de esta terapia en la reducción del edema y del dolor y se ha comprobado su eficacia, que la hace capaz de acelerar en cinco veces la reducción de los edemas en el grado agudo o en las torceduras laterales de tobillo, con relación a otros tratamientos más clásicos. La aplicación de este tratamiento en los esguinces es de unas siete horas.

Es interesante señalar que la respuesta a los PRF es prácticamente inmediata en los síndromes agudos, en contraste con la respuesta más lenta que exhiben los PEMF utilizados en la reparación de las fracturas óseas.

Los PRF son también muy efectivos para cerrar úlceras. Aunque los mecanismos biológicos por los que actúan los PRF son todavía desconocidos, parece que es su espectro de frecuencias más amplio el que les permite conseguir una mayor eficiencia. Así, se ha demostrado ya que los cambios de voltaje inducidos por los PRF en los lugares de ligazón con ciertas macromoléculas son suficientes para afectar a la cinética de los iones de enlace, con el resultado de una modulación de las reacciones bioquímicas apropiadas para los estados inflamatorios de la reparación de los tejidos.

La aplicación del biomagnetismo a las fracturas óseas tiene muchos años de experiencia, se va a describir su aplicación en ellas y en la osteoporosis.

## **6.2. Indicaciones generales y específicas.**

De los efectos biológicos indicados, se deduce que las indicaciones generales de la magnetoterapia son (cuadro):

### ***Indicaciones generales de la magnetoterapia***

- Estimulo específico del metabolismo del calcio en el hueso
- Efecto antiinflamatorio
- Efecto analgésico



- Efecto anticontracturante
- Efecto antiespasmódico
- Efecto hipertérmico e hipotensor
- Efecto de relajación generalizada
- Estímulo del metabolismo del calcio en el hueso, y estímulo sobre el colágeno. Ya se han indicado sus fundamentos, basados en el efecto piezoeléctrico
- Efecto trófico sobre células, tejidos y órganos
- Hipotensor: por su efecto de relajación vascular, cuando actúa sobre zonas amplias
- Sedación general: tanto por el aumento en la producción de endorfinas como por su efecto hipotensor y de relajación muscular

### ***Indicaciones específicas***

El campo de las indicaciones de la magnetoterapia es muy amplio. Los principales campos de interés son:

#### ***1. Procesos reumáticos:***

- En especial, artropatías degenerativas de cualquier localización: gonartrosis, coxartrosis, espondilosis (columna cervical y lumbar), etc.
- En artropatías inflamatorias: artritis reumáticas, espondilitis anquilopoyéticas.

#### ***2. Reumatismos periañiculares:***

- Polimialgias reumática, síndromes discales, radiculitis, ciatalgias, periartritis.
- Miositis y tenomiositis.
- Patología muscular traumática en fase aguda o subaguda.

#### ***3. Trastornos de la osificación:***

- Osteoporosis, tanto generalizadas (posmenopausia) como localizadas (Südeck).
- Retardo de consolidación de las fracturas: se acelera su proceso curativo ya desde los primeros días de aplicación.





- Pseudoartrosis.

#### **4. Traumatología, medicina laboral, medicina deportiva:**

- Contusiones, distorsiones, luxaciones.
- Contracturas musculares.
- Tendinitis, epicondilitis.

#### **5. Patología vascular periférica:**

- Úlceras varicosas y posflebíticas de miembros inferiores, postraumáticas, de cúbito.
- Alteraciones de la circulación periférica tipo acrocianosis y enfermedad de Raynaud.

#### **6. Cirugía:**

- Aceleración de la cicatrización y del proceso curativo de las heridas.
- Quemaduras.

#### **7. Otorrinolaringología:**

- Sinusitis.
- Síndromes vertiginosos secundarios a trastornos de la microcirculación.

#### **8. Neurología:**

- Dolor de origen nervioso, en general.
- Neuralgias: braquial, intercostal, del trigémino.
- Isquialgia, lumbalgia, ciática, migrañas.

#### **9. Medicina interna:**

- Asma bronquial.
- Colitis ulcerosa, úlcera gástrica crónica.
- Nefrosis, nefroesclerosis.
- Insuficiencia hepática, cardíaca.
- Trastornos de la circulación cerebral.
- Estímulo trófico de diversos órganos.



### **10. Trastornos derivados del estrés:**

- Inquietud, insomnio, cefaleas tensionales, taquicardias emocionales, etc.

### **Contraindicaciones**

No existen contraindicaciones absolutas para la aplicación de la magnetoterapia.

Hay sin embargo situaciones que requieren precauciones especiales, y son:

- Enfermos portadores de marcapasos.
- Embarazo.
- Enfermedades víricas, micosis.
- Hipotensión, por la posible producción de una lipotimia.
- Hemorragias o heridas hemorrágicas, por la posibilidad de agravamiento de la hemorragia. Advertencia en los períodos de menstruación en aplicaciones abdominales.

La presencia de placas o implantes metálicos no es contraindicación de la magnetoterapia, ya que su posibilidad de calentamiento es mínima.

### **6.3. La reparación de fracturas óseas.**

Desde tiempo atrás vienen utilizándose los campos magnéticos en la reparación de las fracturas óseas. Sin embargo, sólo a partir de los años cincuenta y sesenta, cuando se recogen resultados estadísticos tras la experimentación con animales, esta aplicación se sistematiza y puede comenzar a hablarse con propiedad de magnetoterapia.

Desde entonces, también la tecnología ha permitido el desarrollo de sistemas de estimulación magnética mucho más precisos y mucho más cómodos para los pacientes, ya que de la existencia única de sistemas invasivos que se utilizaban al principio se ha desarrollado toda una nueva gama en la que están presentes los semiinvasivos y los no invasivos.

La aplicación del bioelectromagnetismo en este campo resulta muy importante, ya que se estima que aproximadamente el 5 por 100 de las fracturas óseas no consigue soldarse en condiciones normales en los seis meses siguientes al momento en que se han producido. Este tipo de fracturas, además, acaba con complicaciones debidas a la destrucción del aporte sanguíneo, la infección y la invasión de tejido blando entre los fragmentos de la fractura, siendo muchas veces la amputación el resultado final.



A este tipo de pacientes suele aplicárseles campos electromagnéticos pulsantes (PEMF) en el lugar de la fractura ocho o diez horas diarias. La función de los campos electromagnéticos sería la de inducir corrientes eléctricas similares a las que existen en el hueso antes de fracturarse.

El colágeno, que es uno de los materiales fundamentales del tejido óseo, es el principal responsable de la piezoelectricidad ósea. (La piezoelectricidad es la electricidad que generan ciertos materiales al ser sometidos a presión o a deformación mecánica. Esta piezoelectricidad puede ser directa, si la electricidad es producida por presión, o inversa, cuando es el material el que sometido al campo eléctrico experimenta una deformación mecánica).

Los PEMF inducen al fibrocartílago blando, presente en la fractura, a que calcifique al mismo tiempo que facilitan el riego sanguíneo para que aporte los elementos necesarios para que pueda realizarse una unión ósea sólida. Aunque se desconocen los mecanismos íntimos que subyacen en estos procesos, parece que estaría implicada la forma en la que aparecen ordenados «en fase» los osteocitos, como resultante del acoplamiento de cada uno de ellos con sus vecinos. Dicha ordenación es mucho más sensible a las señales débiles de lo que es cada célula tomada individualmente y permite explicar cómo pueden detectarse estímulos tan débiles que de otro modo serían enmascarados.

#### **6.4. Osteoporosis.**

Alterar el balance entre la formación del hueso y la destrucción del mismo, facilitando la formación a través de PEMF, es una forma de prevenir la pérdida del hueso.

Experiencias de este tipo comenzaron a realizarse en 1976 por la NASA, preocupada por lo que podía acontecer a los astronautas que durante misiones espaciales se encontraban en atmósferas carentes de la fuerza de la gravedad. Tres años de investigaciones fueron suficientes para comprobar claramente que con PEMF no sólo se evitaba la pérdida de hueso, sino incluso aún más, que allí donde éste ya se había perdido, podía recuperarse.

La aplicación de este tipo de magnetoterapia es muy importante, pues afecta a muchos millones de mujeres posmenopáusicas, cuyas pérdidas óseas las somete al riesgo de fracturas óseas al menor traumatismo.



## 7. Descripción general del proyecto.

Lo novedoso de este proyecto en cuanto a la ***aportación dentro del campo de la magnetoterapia***, es el ***control de pulsos a través de una tensión con forma de onda cuadrada***.

En el mercado nos encontramos en la mayoría de los casos, con que el control de pulsos se realiza a través de una onda senoidal y con el uso de un tiristor para rectificar la onda; pudiendo controlar el tiempo de disparo a través del mismo y así modificar el campo magnético a través de la corriente que circula por la bobina (como veremos en el apartado 8).

El proyecto recibe el nombre de ***Equipo de magnetoterapia con control de pulsos***, y está formado por una bobina la cual es alimentada a través de unos pulsos de tensión generados a través de un dispositivo electrónico que además, proporciona un control sobre la anchura de los mismos, es decir; un control sobre el período y frecuencia de la tensión generada dando lugar a la generación de ***campo magnético pulsante (en permanente movimiento y oscilación)*** dentro del solenoide.

El objetivo de este proyecto se fundamenta en el diseño, construcción y desarrollo de un generador de pulsos magnéticos de baja frecuencia (equipo de magnetoterapia); de entre 5 y 40 Hz.

Por tanto hemos procedido al diseño de un dispositivo electrónico capaz de generar una onda de tensión cuadrada que inyectaremos a la bobina pudiendo controlar el período total de la misma y consecuentemente, teniendo un control del tiempo de exposición del campo magnético pulsante generado en su interior.

El ***equipo de magnetoterapia*** consta de dos elementos: una ***bobina o solenoide*** cilíndrico que será capaz de generar el campo magnético (la cual estará conectada en serie con una pequeña resistencia de 3,3 Ohmios como especificaremos en los sucesivos apartados) y; un ***dispositivo electrónico o controlador*** encargado de generar el campo magnético en el interior del solenoide y el control del tiempo de exposición del mismo o control de pulsos.

La bobina tendrá unas características tales que asegure un campo magnético en el interior de 75 Gauss de intensidad, y que modificando algunas características de la bobina; se puede rebajar a un valor menor (ver apartado 10.3) para según que fines terapéuticos (según que intensidad de campo sirve para tratar unas u otras patologías, como hemos ido definiendo a lo largo del presente proyecto).

La forma del campo magnético en el interior del solenoide será similar a la que representa la función de la intensidad en la carga y descarga de una bobina.



El dispositivo electrónico o controlador permitirá regular el tiempo de exposición del campo magnético en el interior de la bobina; siendo el valor de la intensidad del campo expuesto, como ya hemos especificado, de 75 Gauss.

Este dispositivo estará formado por la combinación de un integrado LM555 con transistores (además de otros componentes electrónicos), los cuales actuarán como interruptores como veremos más adelante, dando como resultado ese control de pulsos inyectados en nuestra bobina; que es el objetivo que fijamos para la consecución de este proyecto.

## 8. Bobina alimentada a través de una tensión con forma de onda senoidal.

### 8.1. Cálculo de la corriente circulante por la bobina

El campo magnético creado por la bobina es debido al paso de la corriente eléctrica que circula por la misma. Nuestro objetivo es poder controlar ese campo magnético, por tanto y en base a lo anterior controlando la corriente eléctrica estaremos en disposición de controlar las características del campo magnético. Este control lo vamos a realizar mediante un tiristor.

El tiristor es un componente electrónico con el cuál podemos dejar pasar o bloquear por completo el paso de la corriente eléctrica sin tener nivel intermedio alguno (aunque no están concebidos para soportar grandes sobrecargas de corriente). Una idea general del mismo es que se puede considerar como el equivalente electrónico de los interruptores mecánicos. El diseño del tiristor permite que éste pase rápidamente a encendido al recibir un pulso momentáneo de corriente en su terminal de control, denominada puerta (o en inglés, *gate*) cuando hay una tensión positiva entre ánodo y cátodo, es decir la tensión en el ánodo es mayor que en el cátodo (ver figura 8.1.). Solo puede ser apagado con la interrupción de la fuente de voltaje, abriendo el circuito, o bien, haciendo pasar una corriente en sentido inverso por el dispositivo. Si se polariza inversamente en el tiristor existirá una débil corriente inversa de fugas hasta que se alcance el punto de tensión inversa máxima, provocándose la destrucción del elemento (por avalancha en la unión).

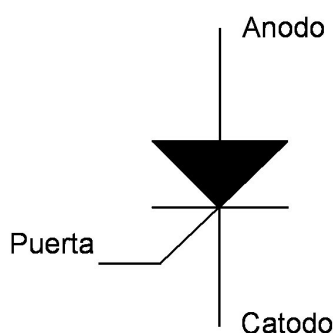


Figura 8.1. Tiristor

Se puede observar que a medida que se aumenta la corriente de puerta se desplaza el punto de disparo. Se puede controlar así la tensión necesaria entre ánodo y cátodo para la transición OFF -> ON, usando la corriente de puerta adecuada (la tensión entre ánodo y cátodo dependen directamente de la tensión de puerta pero solamente para OFF -> ON). Cuanto mayor sea la corriente suministrada al circuito de puerta  $I_G$  (intensidad de puerta), tanto menor será la tensión ánodo-cátodo necesaria

para que el tiristor conduzca. También podemos hacer que el tiristor empiece a conducir si no existe intensidad de puerta y la tensión ánodo-cátodo sea mayor que la tensión de bloqueo.

Para poder modelizar la bobina vamos a representarla por el valor de la resistencia del cobre del bobinado sumado a su valor inductivo. Por tanto su representación va a estar caracterizada por una carga R-L.

El esquema circuital resulta:

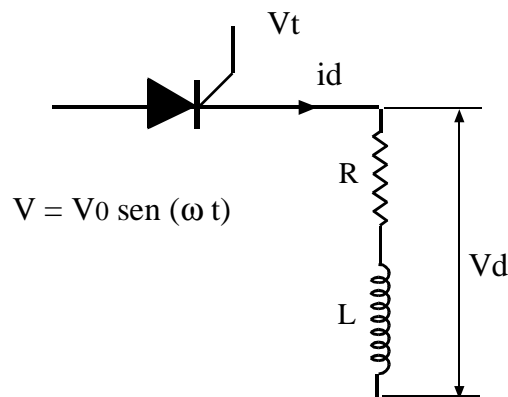


Figura 8.2. Control de pulsos mediante un tiristor

Aplicamos en el circuito una tensión de alimentación  $V = V_0 \text{ sen}(\omega t)$ , es decir, una tensión de onda entrante senoidal.

Podemos observar que desde  $\omega t = 0$  hasta  $\omega t = \pi$  el tiristor está polarizado en directa, sin embargo desde  $\omega t = \pi$  hasta  $\omega t = 2\pi$  está polarizado en inversa. Por tanto con el tiristor podemos controlar el tiempo de disparo (medido en grados o en ms) para controlar la caída de tensión en  $V_d$  (a través de, como hemos comentado arriba, un pulso momentáneo de corriente en su terminal de control o puerta). Consideraremos que el tiempo de disparo es de 0 ms para los cálculos que realizaremos mas adelante, mas específicamente para el cálculo de la intensidad  $i_d(t)$  que recorre la bobina.

Es decir en nuestro caso el modelo del tiristor lo podemos tomar como un diodo, ya que polarizado en directa deja pasar toda la tensión entrante (ON) y en inversa pasa a corte (OFF).

Podemos observar los siguientes puntos:

- Cuando el tiristor pasa a ON, toda la tensión del generador senoidal cae bruscamente sobre la bobina.
- Cuando el tiristor pasa a OFF, la tensión de la bobina pasa bruscamente a cero.





- En este paso brusco de tensión a cero en la bobina aparece un valor máximo de corriente a través de la carga R-L que deberemos tener en cuenta a la hora de realizar cálculos ya que representaremos la forma de onda de la intensidad respecto al tiempo.

Para poder resolver la intensidad que recorre la bobina o solenoide  $i_d(t)$  se halla a partir de la ecuación que rige el comportamiento del circuito; la cuál corresponde a:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_0 \text{sen}(\omega t)$$

Con los cálculos correspondientes (los cuáles los expondremos a continuación) llegamos a la resolución de  $i_d(t)$ ; que nos resulta:

$$i_d = \frac{V_0}{Z} \text{sen} \phi \times e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_0}{Z} \text{sen}(\omega t - \phi)$$

Siendo;

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

$$\phi = \text{arctg} \frac{\omega L}{R}$$

Con esta ecuación podemos hallar el valor de  $i_d(t)$  para cualquier instante de tiempo posterior al disparo (que en nuestro caso, recordemos, son 0 ms).

Más adelante con el programa de cálculo MATLAB y a través del uso de su lenguaje de programación; podremos sacar el cálculo de los valores instantáneos de la corriente además de poder dibujar las diferentes gráficas tanto de la corriente como de la tensión dependientes del tiempo.

Es decir, a través de MATLAB podremos caracterizar en su totalidad la bobina o solenoide controlada su intensidad; a través del tiristor.

Proceso matemático para hallar el valor de la corriente  $i_d(t)$  de la bobina

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_o \operatorname{sen} \omega t$$

$$\frac{di}{dt} + Ri = \frac{V_o}{L} \operatorname{sen} \omega t$$

$$(D + \frac{R}{L})i = \frac{V_o}{L} \operatorname{sen} \omega t \Rightarrow \boxed{i_g = k \cdot e^{-\frac{R}{L}t}}$$

$$i_p = A \operatorname{sen} \omega t + B \cos \omega t; \quad \frac{di_p}{dt} = A \omega \cos \omega t - B \omega \operatorname{sen} \omega t$$

$$A \omega \cos \omega t - B \omega \operatorname{sen} \omega t + \frac{R}{L} A \operatorname{sen} \omega t + \frac{R}{L} B \cos \omega t = \frac{V_o}{L} \operatorname{sen} \omega t$$

$$\left( A \omega + \frac{R}{L} B \right) \cos \omega t + \left( \frac{R}{L} A - B \omega \right) \operatorname{sen} \omega t = \frac{V_o}{L} \operatorname{sen} \omega t$$

$$\left. \begin{aligned} A \omega + \frac{R}{L} B &= 0 \\ \frac{R}{L} A - B \omega &= \frac{V_o}{L} \end{aligned} \right\} A = -\frac{R}{L \omega} B$$

$$-\frac{R}{L} \frac{R}{L \omega} B - B \omega = \frac{V_o}{L}; \quad B = -\frac{V_o}{L \left( \frac{R^2}{L^2 \omega} + \omega \right)} = -\frac{V_o}{\frac{R^2}{L \omega} + L \omega} = -\frac{V_o \omega L}{R^2 + L^2 \omega^2}; \quad \boxed{B = -\frac{V_o \omega L}{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

$$A = -\frac{R}{L \omega} \left( -\frac{V_o \omega L}{R^2 + L^2 \omega^2} \right) = \frac{V_o R}{R^2 + L^2 \omega^2}; \quad \boxed{A = \frac{V_o R}{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

$$i_p = A \operatorname{sen} \omega t + B \cos \omega t$$

$$i_p = \left( \frac{V_o R}{R^2 + L^2 \omega^2} \right) \operatorname{sen} \omega t - \left( \frac{V_o \omega L}{R^2 + L^2 \omega^2} \right) \cos \omega t$$

$$i_p = I_o \operatorname{sen}(\omega t + \phi) = I_o \operatorname{sen} \omega t \cos \phi + I_o \cos \omega t \operatorname{sen} \phi$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{V_o R}{R^2 + L^2 \omega^2} &= I_o \cos \phi \\ -\frac{V_o \omega L}{R^2 + L^2 \omega^2} &= I_o \operatorname{sen} \phi \end{aligned} \right\} I_o = \sqrt{\frac{V_o^2 R^2 + V_o^2 \omega^2 L^2}{R^2 + L^2 \omega^2}} = \frac{V_o}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}}$$

$$\operatorname{tg} \phi = -\frac{\omega L}{R} \Rightarrow \phi = \operatorname{arctg} \left( -\frac{\omega L}{R} \right) = -\operatorname{arctg} \left( \frac{\omega L}{R} \right)$$

$$\boxed{i_p = \frac{V_o}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \operatorname{sen} \left( \omega t - \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R} \right)}$$

$$\boxed{i = k \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_o}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \operatorname{sen} \left( \omega t - \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R} \right)}$$



Por último sólo nos falta hallar el valor de la constante de integración  $K$ , por tanto para  $t=0$  e  $i=0$  resulta:

$$0 = k + \frac{V_o}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \operatorname{sen}\left(-\operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}\right) = k - \frac{V_o}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \operatorname{sen}\left(\operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}\right)$$

$$k = \frac{V_o}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \operatorname{sen}\left(\operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}\right)$$

$$i = \frac{V_o}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \operatorname{sen} \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R} e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_o}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \operatorname{sen}\left[\omega t - \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}\right]$$

$$\text{llamando : } Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R}$$

$$i = \frac{V_o}{Z} \operatorname{sen} \phi e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{V_o}{Z} \operatorname{sen}(\omega t - \phi)$$

$$i = \frac{V_o}{Z} \operatorname{sen}(\omega t - \phi) + \frac{V_o}{Z} \operatorname{sen}(\theta_1 - \phi)$$

Llegando a la ecuación que antes habíamos establecido que rige el comportamiento del circuito.

## 8.2. Caracterización eléctrica y constructiva de la bobina

Para poder definir las características de la bobina debemos realizar un estudio previo para determinar cuál es la mejor relación entre ellas y obtener los resultados más óptimos, es decir que sea más ligera, con menos cobre, alimentada a una tensión mas baja, con menos consumo, minimizar el recalentamiento...

Inicialmente podemos tomar como un dato determinante el diámetro de la bobina. Su diámetro no puede reducirse a más de 21.1 cm para favorecer la introducción cómoda de las extremidades en su interior.

El consumo no puede ser alto para que la fuente de alimentación portátil pueda proporcionarlo.

Otra limitación que nos encontramos es la densidad de potencia por unidad de superficie cuyo valor ensayado se limita a 0.03289W/cm<sup>2</sup> para evitar el calentamiento en la superficie de la bobina por efecto Joule.

Considerando las limitaciones y la mejor optimización obtenemos las siguientes características de nuestra bobina:



NB	350 espiras
LB	12 cm
DB	21.1 cm
DH	1 mm
Vef	24 Voltios

Figura 8.3. Características principales de la bobina

Para poder caracterizar por completo los parámetros de la bobina necesitamos obtener los valores de la resistencia de la bobina, coeficiente de autoinducción, densidad de corriente... Para ello aplicamos las fórmulas que se detallan en las sucesivas hojas.



### 1. Numero de espiras.

$$\beta = \frac{\mu_0 N I}{2L} \left[ \frac{x_1}{\sqrt{R^2 + x_1^2}} - \frac{x_2}{\sqrt{R^2 + x_2^2}} \right]$$

Para  $x_1 = x_2 = \frac{L_B}{2}$  y  $n = \frac{N_B}{L_B}$ ;  $D_B = 2R$

$$\beta = \frac{\mu_0 N_B I}{\sqrt{4R^2 + L^2}} = \frac{\mu_0 N_B I}{\sqrt{D_B^2 + L_B^2}}$$

$$N_B = \frac{\beta}{\mu_0 I} \sqrt{D_B^2 + L_B^2}; \quad D_B (cm); L_B (cm)$$

### 2. Resistencia.

$$R = \rho \frac{\ell}{S} = \rho \frac{L_H}{S_H} = 0,0175 \frac{\pi D_B N_B}{\pi \frac{D_H^2}{4}} = 0,07 \frac{D_B N_B}{D_H^2}; \quad D_B (m); D_H (mm)$$

$$R = 0,0007 \frac{D_B N_B}{D_H^2}; \quad D_B (cm); D_H (mm)$$

### 3. Coeficiente de autoinducción.

$$L = \frac{0,000394 r^2 N^2}{9r + 10\ell}; \quad (mH)$$

$$L = \frac{0,000394 \frac{D_B^2}{4} N_B^2}{9 \frac{D_B}{2} + 10 L_B} = \frac{0,000394 D_B^2 N_B^2}{18 D_B + 40 L_B}; \quad D_B (cm); L_B (cm)$$

### 4. Impedancia.

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} = \sqrt{R^2 + L^2 (2\pi f)^2} = \sqrt{R^2 + (100\pi L)^2}; \quad L(H); Z(\Omega)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (100 \cdot 10^{-3} \pi L)^2} = \sqrt{R^2 + (0,1\pi L)^2}; \quad L(mH), f = 50Hz$$



### 5. Desfase de la corriente.

$$\phi = \arctg \frac{\omega L}{R} = \arctg \frac{2\pi f L}{R} = \arctg 100\pi \frac{L}{R}; \quad L(H); R(\Omega)$$

$$\phi = \arctg \left( 0,1\pi \frac{L}{R} \right); \quad L(mH); R(\Omega)$$

### 6. Tension de pico.

$$V = Z \cdot I; \quad V(V)$$

### 7. Intensidad eficaz.

$$I_{ef} = \frac{I}{2}; \quad I(A)$$

### 8. Densidad de corriente.

$$J = \frac{I_{ef}}{S_H} = \frac{I_{ef}}{\pi \frac{D_H^2}{4}} = \frac{4I_{ef}}{\pi D_H^2}; \quad J(A/mm^2), D_H(mm)$$

### 9. Potencia.

$$P = R \cdot I_{ef}^2; \quad P(W)$$

### 10. Longitud del hilo.

$$L_H = \pi D_B N_B; \quad D_B(cm), L_H(cm)$$

$$L_H = 0,01\pi D_B N_B; \quad D_B(cm), L_H(m)$$

### 11. Peso del hilo.

$$P = \delta_m \tau = \delta_m \pi \frac{D_H^2}{4} L_H; \quad D_H(dm), L_H(dm)$$

$$P_{eso} = 8,9 \frac{\pi}{4} (D_H \cdot 10^{-2})^2 L_H \cdot 10 = 2,225 \cdot 10^{-3} \pi D_H^2 L_H; \quad D_H(mm), L_H(m)$$

### 12. Numero de capas.

$$N_C = \frac{N_B D_H}{10 L_B} = 0,1 \frac{N_B D_H}{L_B}; \quad D_H(mm), L_B(cm)$$



Una vez aplicadas, obtenemos los parámetros característicos de la bobina o solenoide. Los resultados quedan reflejados en la figura 8.4.:

RESISTENCIA BOBINA	5.1695 Ohmios
COEFICIENTE AUTOINDUCCIÓN	24.991929 mH
INICIO DEL DISPARO	0.0 ms
CORRIENTE DE PICO	4.189930 Amperios
CORRIENTE EFICAZ	2.249868 Amperios
DENSIDAD DE CORRIENTE	2.864620 A/mm <sup>2</sup>
POTENCIA BOBINA	26.167513 W
POTENCIA SUPERFICIAL	32.896438 mW/cm <sup>2</sup>
CAMPO MAGNÉTICO	75.918844 Gauss
PESO COBRE	1.621736 Kg
NÚMERO DE CAPAS	3.0 capas

Figura 8.4. Características generales de la bobina

### 8.3. Programa para el cálculo de las características de la bobina.

Para favorecer los cálculos de las diferentes características eléctricas y constructivas de la bobina, los cálculos se han realizado a través del programa de cálculo matemático MATLAB 7.0.1.

Como inciso e idea general, MATLAB (Matriz Laboratory) es un software de cálculo muy usado en universidades, centros de investigación y por ingenieros. Está compuesto al mismo tiempo de un entorno y un lenguaje de programación. La manera mas fácil de visualizar MATLAB es pensar en él como una calculadora totalmente equipada aunque, en realidad, ofrece muchas más características y es mucho más versátil que cualquier calculadora. Es decir, la idea se centra en que MATLAB es una herramienta para hacer cálculos matemáticos.

El código fuente utilizado en el programa para poder llegar a los valores definitivos de los parámetros de la bobina reflejados en la figura 8.4.; son los que se especifican a continuación.





### % cálculo bobina magnetoterapia (MATLAB)

```
clc
clear all

V=24;           % tensión eficaz
f=50;           % frecuencia
T1=0;           % tiempo de disparo en ms
Nes=350;        % número de espiras
DH=1;           % diámetro hilo en mm
LB=12;          % longitud bobina en cm
DC=20.8;        % diámetro carrete en cm
r=0;            % resistencia en serie con la bobina
N=1000;         % número de muestras del periodo
VO=V*sqrt(2);   % tensión de pico

Ncapas=round(Nes*DH/(LB*10)); % calculo del número de capas del bobinado
DB=DC+Ncapas*DH/10;          % Calculo del diámetro medio del bobinado
RB=7e-4*Nes*DB/DH^2;         % cálculo resistencia bobina
R=RB+r;                       % resistencia total
L=394e-9*DB^2*Nes^2/(18*DB+40*LB); % cálculo coeficiente autoinducción
XL=2*pi*f*L;                  % cálculo reactancia
Z=sqrt(R^2+XL^2);              % cálculo impedancia
FI=atan(XL/R);                 % cálculo argumento

% Puesta a cero de los valores instantaneos de la corriente
for i=1:N;
    I(i)=0;
end

% cálculo de los valores instantaneos de la corriente desde el instante de disparo
for i=fix(N*T1*f/1000)+1:N;
    t=i*(1/f)/N;
    I(i)=-(VO/Z)*(sin(2*pi*f*T1/1000-FI)*exp(-R*(t-
    T1/1000)/L))+(VO/Z)*sin(2*pi*f*t-FI);
end

% cálculo de los intervalos de tiempo
S=0;
t(1)=0;
for i=2:N;
    t(i)=S+(1/f)/N;
    S=S+(1/f)/N;
end

% busca valor de pico de la corriente
i=1;
while I(i+1)-I(i)>=0;
```



```
i=i+1;
end
IP=I(i);    % valor de pico de la corriente

% busca valor de paso por cero de la corriente
i=1;
while I(i+1)>=0;
    i=i+1;
end
NF=i;      % número de muestra de la corriente hasta el paso por cero

% calcula la corriente eficaz
S=0;
for i=1:NF;
    S=S+I(i)^2;
end
Ief=sqrt(S/N); % valor eficaz de la corriente

% Campo en Gauss
B=0.4*pi*Nes*IP/sqrt(LB^2+DB^2);

% Valores insatantaneos de campo
Bi=0.4*pi*Nes*I/sqrt(LB^2+DB^2);

% Densidad de corriente en A/mm^2
J=4*Ief/(pi*DH^2);

% Potencia en W
P=RB*Ief^2;

% Potencia disipada por unidad de superficie en mW/cm2
PS=1000*P/(pi*DB*LB);

% Peso de cobre en kg
Peso=2.225e-5*pi^2*DH^2*DB*Nes;

% pone a cero los valores de la corriente inversa
for i=NF:N;
    I(i)=0;
end

% pone a cero los valores del campo inverso
for i=NF:N;
    Bi(i)=0;
end
```



```
% dibuja la corriente desde el inicio hasta que pasa por cero
plot(t(1:N),I(1:N));
grid

% dibuja el campo desde el inicio hasta que pasa por cero
plot(t(1:N),Bi(1:N));
grid

disp(sprintf('TENSIÓN ALIMENTACIÓN  =% f V',V));
disp(sprintf('FRECUENCIA            =% f Hz',f));
disp(sprintf('DIAMETRO CARRETE      =% f cm',DC));
disp(sprintf('DIAMETRO BOBINA       =% f cm',DB));
disp(sprintf('LONGITUD BOBINA       =% f cm',LB));
disp(sprintf('NUMERO DE ESPIRAS      =% f',Nes));
disp(sprintf('DIAMETRO HILO         =% f mm',DH));
disp(sprintf('RESISTENCIA BOBINA      =% f Ohmios',RB));
disp(sprintf('RESISTENCIA EN SERIE =% f Ohmios',r));
disp(sprintf('COEFICIENTE AUTOINDUCCIÓN =% f mH',L*1000));
disp(sprintf('"%f mm',"));
disp(sprintf('INICIO DEL DISPARO    =% f ms',T1));
disp(sprintf('CORRIENTE DE PICO      =% f A',IP));
disp(sprintf('CORRIENTE EFICAZ      =% f A',Ief));
disp(sprintf('DENSIDAD DE CORRIENTE =% f A/mm2',J));
disp(sprintf('POTENCIA BOBINA       =% f W',P));
disp(sprintf('POTENCIA RESISTENCIA =% f W',r*Ief^2));
disp(sprintf('POTENCIA SUPERFICIAL =% f mW/cm2',PS));
disp(sprintf('CAMPO MAGNÉTICO      =% f Gauss',B));
disp(sprintf('"%f mm',"));
disp(sprintf('PESO COBRE            =% f kg',Peso));
disp(sprintf('NÚMERO DE CAPAS      =% f capas',Ncapas));
disp(sprintf('"%f mm',"));
```

#### 8.4. Gráfica de la corriente y el campo dependiente del tiempo.

MATLAB proporciona estas gráficas a través de los datos de nuestra bobina introducidos en el programa (ver el apartado anterior).

- Gráfico del campo creado por la bobina (Gauss, eje Y) frente al tiempo (ms, eje X).

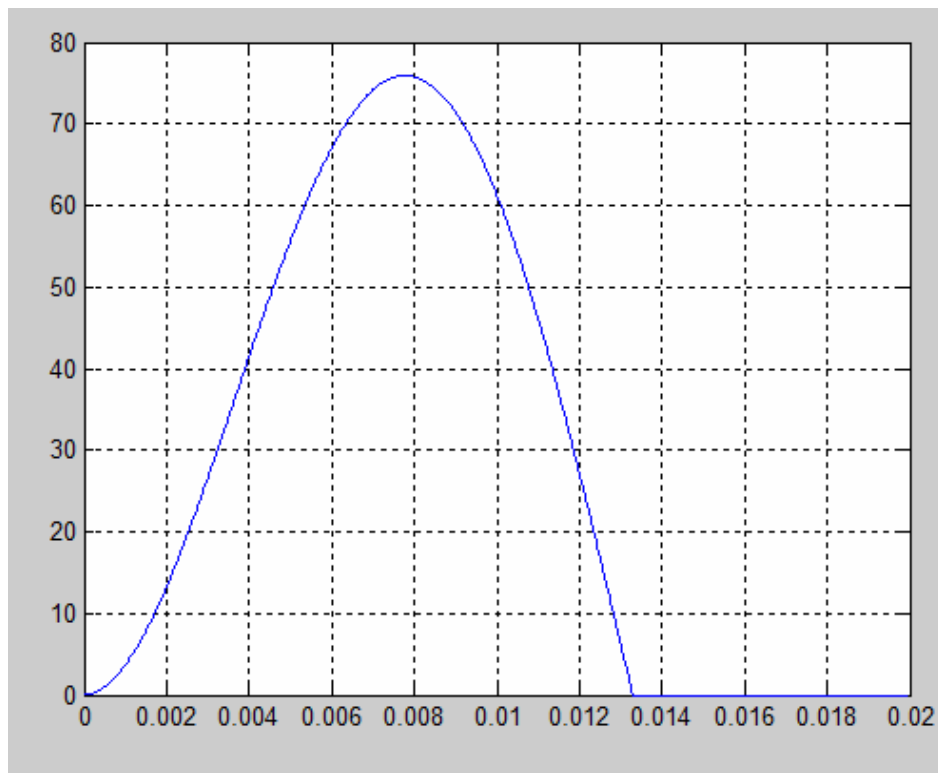


Figura 8.5. Gráfica del campo creado por la bobina frente al tiempo

- Gráfico de la intensidad por la bobina (Amperios, eje Y) frente al tiempo (ms, eje X)

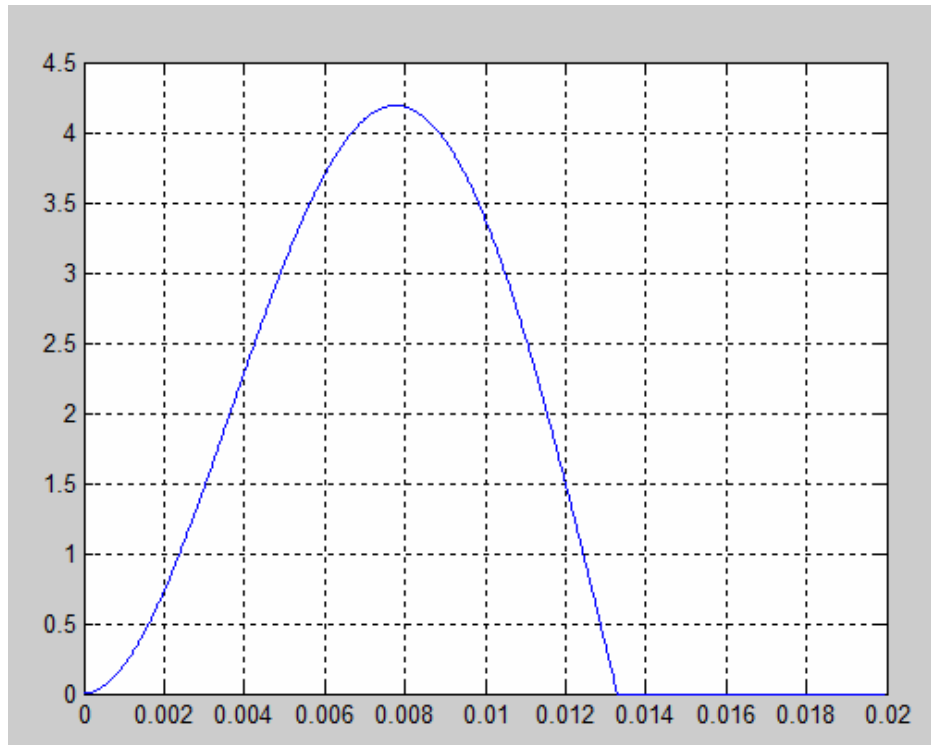


Figura 8.6. Gráfica de la intensidad por la bobina frente al tiempo

## 8.5. Dimensiones de la bobina.

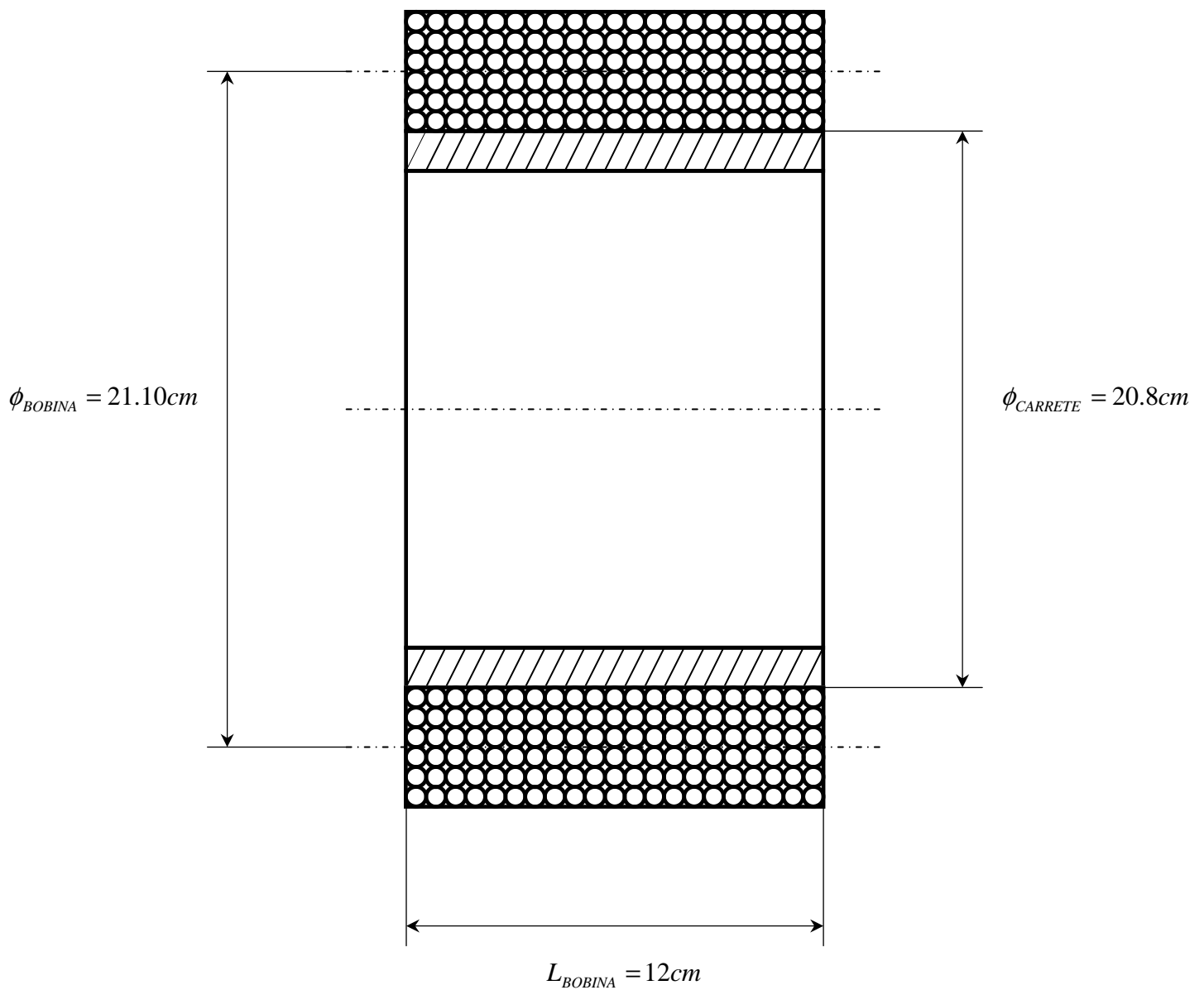
Vamos a definir físicamente la bobina, cuyas dimensiones las reflejamos a continuación.

Necesitamos de un pequeño plano que nos sirva de aproximación en cuanto a las dimensiones tanto de longitud como de diámetro de nuestra bobina, para luego poder proceder a la construcción física de la misma partiendo de las medidas establecidas y que hemos tenido en cuenta a la hora de realizar los cálculos pertinentes en apartados anteriores.

La parte inferior y superior está formada por círculos de pequeño diámetro que representan el bobinado del solenoide o bobina, siendo el diámetro del hilo de cobre del arrollamiento de 1 mm. Cabe destacar que este bobinado es representativo ya que el número total de espiras son 350 y se necesitan 3 capas para el arrollamiento; por tanto se arrollan en cada capa 116.5 espiras para conformarla.



La sección longitudinal de la misma queda como sigue:



## 8.6. Construcción de la bobina.

Una vez realizados los cálculos de la corriente circulante por la bobina así como los cálculos teóricos de la caracterización eléctrica y constructiva; procedemos a explicar, como se ha realizado la construcción de la bobina. Partimos de un tubo de PVC (ver figura 8.7) de diámetro 20.8 cm (diámetro de carrete) y de longitud de 12 cm que son los especificados en nuestros cálculos. Una vez elegido el tubo de PVC, pasamos a arrollar el hilo de cobre de 1 mm. Como ya hemos explicado en el apartado anterior el número total de espiras es de 300 y se necesitan 3 capas para realizar el arrollamiento, por tanto arrollamos en cada capa 116.5 espiras aproximadamente.



Figura 8.7. Tubo de PVC

Finalmente y después del proceso descrito, la bobina queda construida como mostramos a continuación:

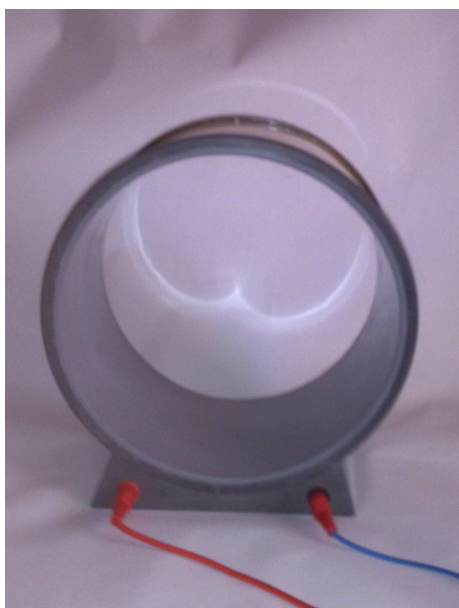


Figura 8.8. Vista frontal de la bobina

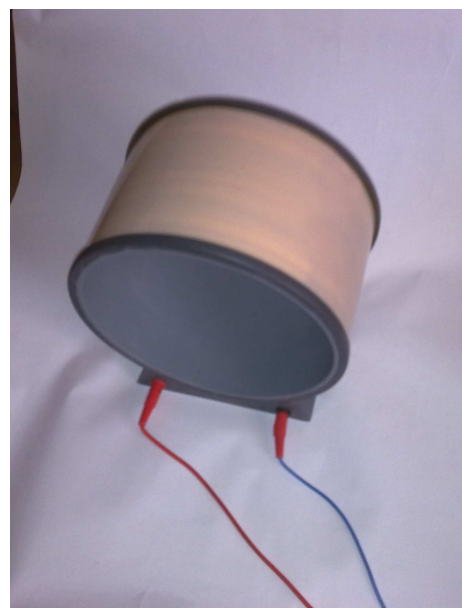


Figura 8.9. Vista aérea de la bobina



## 9. Bobina alimentada a través de una tensión con forma de onda cuadrada.

Debido a las limitaciones que supone el realizar un control de las frecuencias en las que trabaja el solenoide bajo alimentación de onda senoidal, e introduciendo un control de pulsos novedoso dentro de los existentes en el mercado; optamos por alimentar el circuito con una tensión de alimentación con forma de onda cuadrada.

Por tanto nuestro objetivo es generar **una tensión con forma de onda cuadrada** de tal forma que podamos **modificar la anchura de sus pulsos** y por tanto su frecuencia, desde muy bajas hasta altas (entre 5 y 42 Hz aproximadamente, ya que en la práctica y una vez diseñado el dispositivo electrónico resultan unos 40 Hz). Dándonos como resultado, al alimentar con esta tensión cuadrada a la bobina; un campo magnético pulsante en el interior de la misma.

Para ello partiremos de una tensión en continua a partir de la cuál y a través de un dispositivo electrónico (el cual especificaremos más adelante) controlaremos el período y consecuentemente la frecuencia de nuestro circuito. Para este control del período fijaremos un valor de  $T_{ON}$  (tiempo en el que la señal está en estado alto) para garantizar la carga de la bobina y el valor de la corriente eficaz que circula por ella; y variaremos el valor de  $T_{OFF}$  (tiempo en el que la señal está en estado bajo).

El **campo magnético pulsante** se generará en el centro de la bobina con un valor de intensidad de campo de **75 Gauss** con una **forma de onda semejante a la que representa la función de la intensidad en la carga y descarga de una bobina**; consecuentemente variando el período estaremos variando el tiempo de exposición de dicho campo magnético.

Para poder establecer las frecuencias (tanto muy bajas como altas) tendremos que tener en cuenta las limitaciones del **carácter R-L de la carga**; y consecuentemente, de la **constante de tiempo R-L**. Esta situación la definiremos en los siguientes apartados a través de los cálculos matemáticos, dejando establecidas todas las condiciones de operación.

### 9.1. Cálculo de la corriente circulante por la bobina.

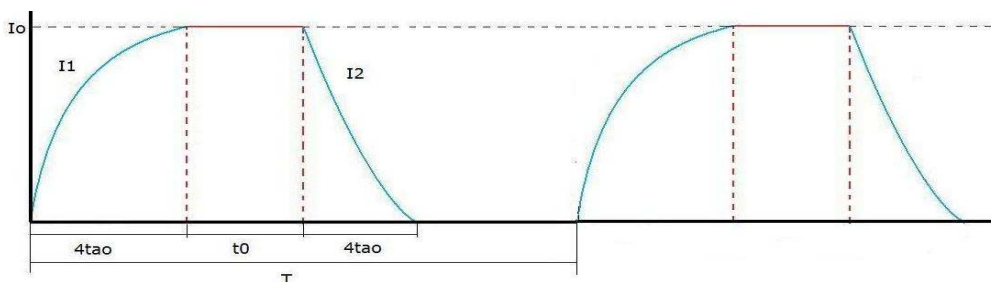


Figura 9.1. Forma de onda de la  $i(t)$  por la bobina en un circuito R-L. Carga y descarga

Para poder determinar las funciones  $I_1$  e  $I_2$  debemos atender al comportamiento de nuestro circuito, el cual corresponde a un circuito R-L serie:

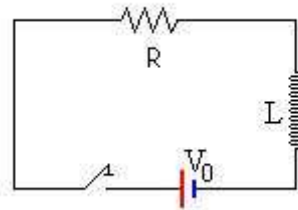


Figura 9.2. Circuito R-L serie

Al cerrar el interruptor estamos inyectando al circuito una tensión  $V_0$  y observamos que la corriente no alcanza instantáneamente el valor de  $I_0 = V_0/R$  dado por la ley de ohm sino que tarda un cierto tiempo. Esta corriente, que es variable (se llama transitoria hasta llegar a su estado estable) crea un campo magnético. Este campo magnético genera a su vez una corriente cuyo sentido esta definido por la ley de Lenz, que establece: "El sentido de la corriente inducida sería tal que su flujo se opone a la causa que la produce". Es debido a esta oposición que la corriente no sigue inmediatamente a su valor máximo, sino que sigue la forma que observamos en la gráfica de la figura 9.1.;  $I_1$ .

La duración de esta carga está definida por la constante de tiempo  $\tau$ , estableciendo que la bobina alcanza su máxima corriente cuando  $t = 4 \times \tau$ . La constante de tiempo se define como:

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Para poder obtener la corriente de carga de la bobina en función del tiempo formulamos la ecuación del circuito sustituyendo la autoinducción por una f.e.m. equivalente. Esto se representa en la figura 9.3.:

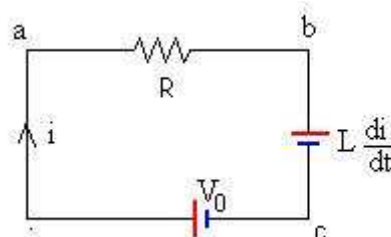


Figura 9.3. Corriente de carga de la bobina

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0$$

Por tanto nos queda:  $iR + L \frac{di}{dt} - V_0 = 0$

Integrando llegamos a la expresión de  $i(t)$  de carga o  $I_1$  en la gráfica de la figura 9.1.; con las condiciones iniciales  $t = 0; i = 0$  resulta:

$$\int_0^i \frac{L di}{V_0 - iR} = \int_0^t dt ;$$

Finalmente obtenemos la expresión:  $i = \frac{V_0}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = I_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = I_1$

Una vez que se ha establecido la corriente máxima en el circuito y desconectando la fuente de alimentación  $V_0$ ; observamos que la corriente no alcanza el valor cero de forma instantánea sino que tarda cierto tiempo en desaparecer del circuito.

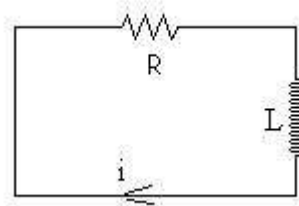


Figura 9.4. Desconexión de la tensión

Como ha sucedido en el establecimiento de la corriente en el circuito, la razón de este comportamiento la debemos buscar por el papel jugado por la autoinducción  $L$  en la que se genera una f.e.m. que se opone a la disminución de corriente. Para formular la ecuación del circuito sustituimos la autoinducción por una f.e.m. equivalente. Medimos la diferencia de potencial entre los extremos de cada uno de los dos elementos que forman el circuito. Debemos tener en cuenta que  $i$  disminuye con el tiempo por lo que la derivada  $di/dt$  tiene que ser menor que cero o lo que es lo mismo, negativa. Veamos:

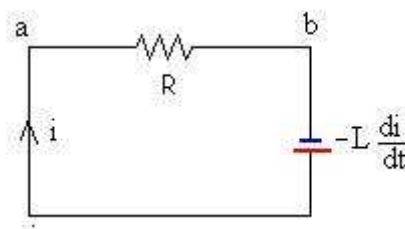


Figura 9.5. Corriente de descarga de la bobina



$$V_{ab} + V_{ba} = 0$$

Por tanto nos queda:  $iR + L \frac{di}{dt} = 0$

Integrando llegamos a la expresión de  $i(t)$  de descarga o  $I_2$  en la gráfica de la figura 9.1.; con las condiciones iniciales  $t = 0; i = i_0$  resulta:

$$\int_{i_0}^i \frac{di}{i} = -\frac{R}{L} \int_0^t dt;$$

Finalmente obtenemos la expresión:  $i = \frac{V_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = I_2$

Una vez llegados a este punto ya tenemos definidas la función de establecimiento de corriente en nuestro circuito ( $I_1(t)$ ) como la de caída de corriente ( $I_2(t)$ ). El siguiente paso será hallar la corriente eficaz que circula por nuestro circuito, definiéndose de la siguiente forma:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt}$$

Fijándonos en el período total de la onda (ver figura del principio del apartado) vemos que entra en juego dentro de la integral tanto la parte de la función  $I_1$ , como la parte de  $t_0$  así como la parte de la función  $I_2$ . Resulta lo siguiente:

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left( \int_0^{4\tau} I_0^2 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})^2 dt + \int_0^{t_0} I_0^2 dt + \int_0^{4\tau} I_0^2 e^{-\frac{2t}{\tau}} dt \right)}$$

Simplificando la expresión, resulta:

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{\int_0^{4\tau} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})^2 dt + \int_0^{t_0} dt + \int_0^{4\tau} e^{-\frac{2t}{\tau}} dt}$$

Resolviendo cada integral por separado, nos queda:

$$Integral_1 = \int_0^{4\tau} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})^2 dt = \int_0^{4\tau} (1 + e^{-\frac{2t}{\tau}} - 2e^{-\frac{t}{\tau}}) dt$$

$$Integral_1 = \left[ t - \frac{\tau}{2} e^{-\frac{2t}{\tau}} + 2\tau e^{-\frac{t}{\tau}} \right]_0^{4\tau} = \left[ 4\tau - \frac{\tau}{2} e^{-8} + 2\tau e^{-4} - 0 + \frac{\tau}{2} - 2\tau \right]$$



$$Integral_1 = \tau \left[ 4 + \frac{1}{2} - 2 - \frac{1}{2e^8} + \frac{2}{e^4} \right] = \tau \left[ \frac{5}{2} - \frac{1}{2e^8} + \frac{2}{e^4} \right]$$

$$Integral_2 = \int_0^{4\tau} e^{-\frac{2t}{\tau}} dt = -\frac{\tau}{2} \left[ e^{-\frac{2t}{\tau}} \right]_0^{4\tau} = -\frac{\tau}{2} [e^{-8} - e^0]$$

$$Integral_2 = \frac{\tau}{2} [1 - e^{-8}]$$

$$Integral_0 = \int_0^{t_0} dt = t_0$$

Sustituyendo en la ecuación original y operando,  $I_{ef}$  queda determinada:

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{\tau \left[ \frac{5}{2} - \frac{1}{2e^8} + \frac{2}{e^4} \right] + \frac{\tau}{2} [1 - e^{-8}] + t_0}$$

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{\tau \left( 3 - \frac{1}{e^8} + \frac{2}{e^4} \right) + t_0}$$

Finalmente:

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{2.9637\tau + t_0} ; \text{ si } t_0 = 0 \Rightarrow I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{2.9637\tau}$$

Aproximando:

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{3\tau + t_0} ; \text{ si } t_0 = 0 \Rightarrow I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{3\tau}$$

## 9.2. Caracterización y modelizado de la bobina.

Ya tenemos definido el valor de la corriente eficaz que circula por nuestro circuito.

Ahora debemos caracterizar el valor que deben adquirir tanto la inductancia como la resistencia que caracterizan la bobina de nuestro circuito y para ello nos vamos a fijar en los valores reflejados en el apartado correspondiente a la caracterización eléctrica y constructiva de la bobina. En dicho apartado podemos observar que los valores de la R y L son los siguientes (redondeamos valores):

$$R = 5.17 \text{ Ohmios}$$

$$L = 24.99 \times 10^{-3} \text{ Henrios}$$

Con esta primera aproximación veremos si los resultados son acordes con un patrón determinado de comportamiento. Este patrón lo vamos a definir en función del valor que adquiriera la corriente eficaz de nuestro circuito; ya que basándonos en los resultados ensayados para la bobina cuando la tensión de alimentación era senoidal ( $V = V_0 \text{sen}(\omega t)$ ) observábamos que el valor eficaz de la corriente adquiría el valor de 2.2498 Amperios. Con este valor comprobábamos experimentalmente que la bobina adquiría una temperatura de calentamiento aceptable y que no era recomendable sobrepasarlo; expresándose el valor de la potencia disipada en la bobina a través de su resistencia como:

$$P = RI_{ef}^2 = 26.167513W$$

En consecuencia tomamos como patrón de funcionamiento el valor de la corriente eficaz de la bobina como 2.24 Amperios y por tanto, tomando como aceptable valores iguales o menores al mismo y tomando como no aceptable valores mayores al mismo; realizaremos los cálculos para los valores de R y L que hemos establecido anteriormente y tomaremos las decisiones pertinentes en función de los resultados observados.

Realizamos pues, los cálculos para nuestro circuito que resulta ser un circuito R-L serie (cuyas justificaciones de funcionamiento ya las hemos analizado) y analizamos su comportamiento para poder establecer las bases de diseño de nuestra bobina o solenoide. El circuito resultante se muestra a continuación en la figura 9.6.:

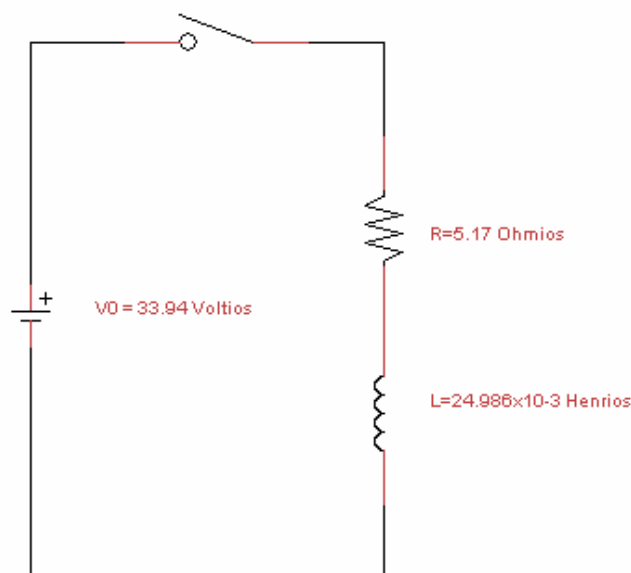


Figura 9.6. Caracterización y modelizado inicial de la bobina

*Nota:*  $V_0 = V_{ef} \times \sqrt{2}$



El primer cálculo que debemos realizar es la determinación de la  $\tau$  de nuestro circuito:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{24.986 \times 10^{-3}}{5.17} = 4.84 \text{ ms}$$

Otro parámetro característico será hallar el período mínimo, el cual nos determinará la frecuencia máxima de operación. Sabemos que el período está formado por  $T = 4\tau + t_0 + 4\tau$  y que debemos hacer  $t_0$  lo más pequeño posible para que el calentamiento de la bobina sea inferior, siendo la corriente máxima y consecuentemente el campo máximo.

Entonces nos situamos en la situación límite expresando el período mínimo posible de la siguiente forma:  $T_{\min} = 8\tau$ , teniendo en cuenta que a partir de  $t = 4 \times \tau$  es cuándo la bobina alcanza su máxima corriente; resultándonos lo siguiente:

$$T_{\min} = 8\tau = 38.72 \text{ ms} \approx 39 \text{ ms} \Rightarrow f_{\max} = \frac{1}{T_{\min}} = 25.82 \text{ Hz}$$

Ahora debemos determinar el valor de la corriente eficaz de nuestra bobina ensayada, ya que como hemos especificado anteriormente será este valor prioritariamente el que nos refleje si el diseño es óptimo a través de parámetros como el calentamiento del solenoide. En consecuencia:

$$I_{\max} = I_0 = \frac{24\sqrt{2}}{R} = \frac{33.94 \text{ V}}{5.27 \Omega} = 6.44 \text{ A} \Rightarrow I_0 = 6.44 \text{ A}$$

Por tanto y en función de la ecuación que define la corriente eficaz resulta:

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{3\tau} = \frac{6.44}{\sqrt{39 \times 10^{-3}}} \sqrt{3 \times 4.84 \times 10^{-3}} = 3.9294 \text{ A}$$

Observamos que  $3.9294 \text{ A} \gg 2.24 \text{ A}$ ; siendo éste un valor muy elevado para el funcionamiento de nuestra bobina y no recomendable. Por tanto nuestro diseño no es óptimo y debemos buscar otras soluciones a la hora de construir nuestro solenoide.

El problema en cuestión se debe al elevado valor de la corriente eficaz que circula por la bobina. Un posible camino de cálculo para poder alcanzar éste objetivo lo podemos hallar disminuyendo el valor de  $V_0$  o equivalentemente; limitando el valor de  $I_0$  ya que  $I_0 = V_0/R$ .

Resolviendo la ecuación analítica y asignando a  $I_{ef}$  un valor en torno a nuestros  $2.24 \text{ A}$ ; resulta el valor de  $I_0$ :





$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{3\tau}$$

$$2.24 = \frac{I_0}{\sqrt{39 \times 10^{-3}}} \sqrt{3 \times 4.84 \times 10^{-3}} \Rightarrow I_0 = 3.6711A$$

Es decir, que tomando un valor para la corriente de pico en torno a los 3.6711 Amperios estaremos en condiciones de establecer un correcto funcionamiento de la bobina. Establezco en base a los cálculos un valor para  $I_0$  de 4 Amperios:

$$I_0 = 3.671106A \Rightarrow I_0 = 4A$$

La resistencia total en serie con la inductancia (siendo  $R_t$  la suma de la resistencia  $R$  que caracteriza la bobina más la que conectamos en serie con ella) resulta de la siguiente forma:

$$R_t = \frac{V_0}{I_0} = \frac{24\sqrt{2}}{4} = 8.4852\Omega \approx 8.5\Omega$$

Adquiriendo la constante de tiempo  $\tau$  el siguiente valor, la cuál queda reducida a:

$$\tau = \frac{L}{R_t} = \frac{24.986 \times 10^{-3} H}{8.5\Omega} = 2.94ms$$

Por consiguiente la frecuencia máxima de operación determinada a partir del período, que recordemos era igual a  $8\tau$ ; será mayor que antes:

$$T_{\min} = 8\tau = 23.52ms \Rightarrow f_{\max} = \frac{1}{T_{\min}} = 42.51Hz$$

Con todas las características circuitales definidas y análogamente a como habíamos realizado el ensayo de la bobina con el valor anterior de la corriente eficaz (3.9294A); el nuevo valor de la corriente eficaz circulante en nuestro circuito adquiere el valor:

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{3\tau} = \frac{4}{\sqrt{23.52 \times 10^{-3}}} \sqrt{3 \times 2.94 \times 10^{-3}} = 2.4494A$$

Observamos que  $2.4494A \approx 2.24A$ ; siendo este un valor aceptable para el adecuado funcionamiento de nuestro solenoide. Por tanto nuestro diseño resulta ser óptimo y difiere con respecto al anterior diseño en que colocamos una resistencia en serie con la resistencia característica de la bobina de valor  $5.27\Omega$ ; cuyo valor es de  $3.3\Omega$  (ya que la resistencia total

resultante en serie con la inductancia es de  $8.5\Omega$ ). Con este valor de 4 Amperios de corriente de pico y con el período mínimo que nos asegure la carga de la bobina a este valor; obtendremos un valor de campo magnético en interior de la misma (en el centro) de aproximadamente 75 Gauss, como habíamos comprobado con los cálculos de MATLAB del apartado 8.3. El circuito resultante se muestra en la figura 9.7.

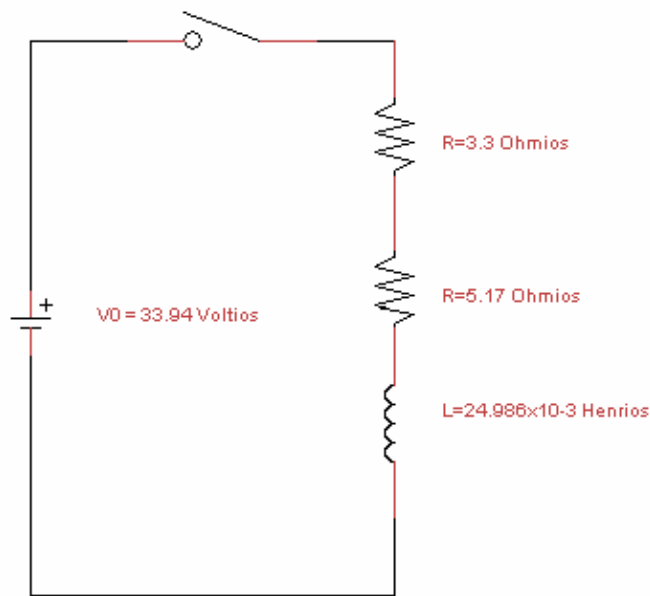


Figura 9.7. Caracterización y modelizado final de la bobina

Quedando definido el calentamiento de la resistencia en serie con la bobina como la potencia que se disipa en la misma, resultando:

$$P = R \times I_{ef}^2 = 3.3 \times 2.4494^2 = 19.7985W \approx 20W$$

Para conformar esta resistencia de  $3.3\Omega$  en función de la potencia de 20W que se disipa en la misma y en vista a hacerlo con valores de resistencia normalizados; optamos por conectar tres resistencias cerámicas (las cuales aguantan más corriente que las convencionales) en paralelo de  $10\Omega$ .

Al conectarlas en paralelo, la corriente que recorre cada resistencia es tres veces menor ( $\frac{2.4494}{3} = 0.81A$ ) que en serie (optaríamos por tres resistencias de  $1.1\Omega$ ) y en consecuencia podemos elegir las resistencias normalizadas de  $10\Omega$  en paralelo resultando los  $3.3\Omega$  que necesitamos; disipándose igualmente 20W.

Las tres resistencias deben tener cada una un valor de  $10\Omega$ , una tolerancia o precisión de 5% y una potencia nominal de 8W.



## 10. Dispositivo electrónico para generar tensión de onda cuadrada con control de pulsos.

Como habíamos especificado al principio del apartado 9, nuestra finalidad es generar una **tensión con forma de onda cuadrada** de tal forma que podamos **modificar la anchura de sus pulsos** o lo que es lo mismo, su frecuencia; desde muy bajas hasta altas: entre 5 y 40 Hz. La cual será conectada para alimentar a nuestro circuito modelizado formado por la bobina en serie con la resistencia.

Una vez llegados a este punto en el cual ya tenemos modelizado el circuito formado por la bobina (caracterizada por la inductancia  $L$  y la resistencia de  $5.17\ \Omega$ ) en serie con la resistencia de  $3.3\ \Omega$  y tenemos definida la frecuencia máxima teórica de operación del mismo (42.51 Hz, ya que definidas las características de nuestro dispositivo electrónico nos resultará una frecuencia en la práctica de 40 Hz); estamos en condiciones de establecer un dispositivo electrónico capaz de generar una onda de tensión cuadrada con control sobre su período. Ésta generación de tensión y control de pulsos lo vamos a realizar a través de un dispositivo electrónico el cual vamos a caracterizar, modelizar y explicar a través de los distintos bloques electrónicos y cálculos analíticos a lo largo de este apartado.

Cabe destacar dos etapas bien diferenciadas: la **etapa de potencia** y la **etapa de control**.

La **etapa de potencia** es la que suministra una tensión continua a través del rectificado y posterior filtrado de la tensión que suministra la red.

La segunda etapa es la de control, la cual a través de una serie de componentes electrónicos conseguiremos controlar esa tensión continua dada por la etapa de potencia para conseguir la generación de la tensión con forma de onda cuadrada controlando por consiguiente, lo que ya es sabido, la anchura del pulso  $T_{OFF}$  y fijando para  $T_{ON}$  el valor de  $4\tau$  que me asegura la carga de la bobina al valor de corriente de pico adecuado (que en base a los cálculos resulta de unos 4A).

La **etapa de control** esta formada por **tres bloques** característicos:

- Primer bloque: **Multivibrador astable con el LM555.**
- Segundo bloque: **Circuito inversor.**
- Tercer bloque: **Conexión Darlington. Diodo de descarga.**

La conexión de estos tres bloques conformará la etapa de control que en combinación con la etapa de potencia resultará el dispositivo que generará nuestra tensión pulsante con forma de onda cuadrada. De forma esquemática y como primera aproximación, podemos conformar la

estructura de nuestro dispositivo electrónico (para visualizar tanto la etapa de control como la de potencia) como sigue:

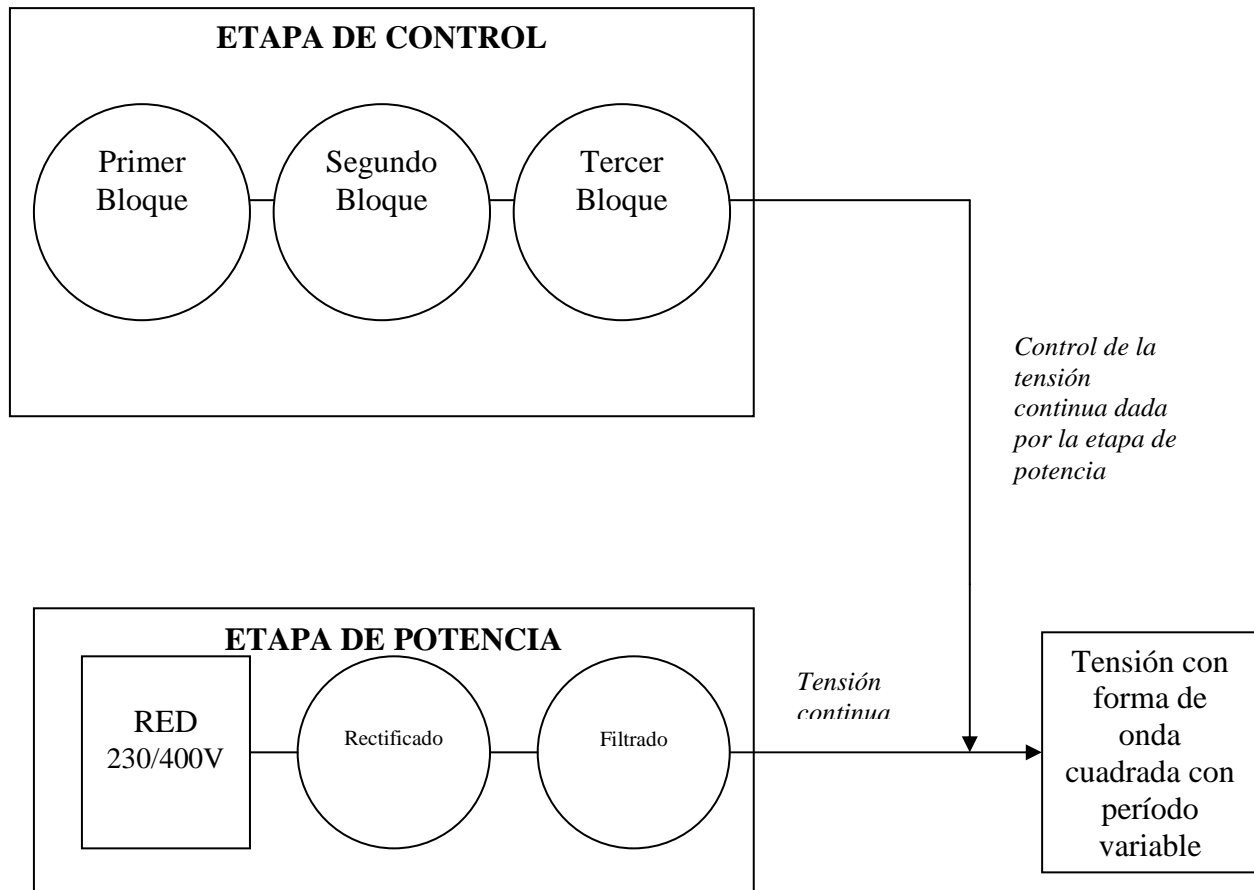


Figura 10.1. Esquema de la estructura del dispositivo electrónico

Todo esto será especificado a continuación en los correspondientes apartados.

### 10.1. Etapa de potencia: rectificación y filtrado.

A través del dispositivo electrónico que hemos nombrado vamos a generar y controlar el período (valor fijo de  $T_{ON}$  y variable de  $T_{OFF}$ ) de una tensión con forma de onda cuadrada. Para conseguir este objetivo vamos a partir de una tensión continua a partir de la cual vamos a conseguir variar el período variando la anchura de  $T_{OFF}$  según nos convenga (y como ya hemos establecido, fijando un valor para  $T_{ON}$ ), por tanto la primera etapa a desarrollar es conseguir una tensión continua.

Esta fuente de alimentación continua, que es parte del dispositivo o circuito electrónico; proviene de la rectificación de la corriente alterna que nos suministra la red por medio de diodos y el posterior filtrado de esta tensión pulsante en onda completa.

### 10.1.1. Rectificador monofásico de onda completa (puente Graëtz).

Esta primera etapa de rectificación estará formada por un transformador monofásico de potencia el cual nos transforma la tensión de fase de la red de 230V (la de línea son 400V) a un valor reducido con el que podamos operar; que en nuestro caso serían unos 24V.

Para tener una referencia comercial a la hora de poder adquirirlo, el transformador monofásico elegido para nuestro circuito se caracterizaría por: 230/24-48V; 25 VA. Por establecer uno en concreto dentro de todos los disponibles, escogemos el modelo: *NRG-25/24-48*; del fabricante *TECNOTRAFO*. Sus características son las reflejadas en la figura 10.2. (referencia, la marcada con una elipse):

CÓDIGO ARTÍCULO ARTICLE CODE	RELACIÓN DE TENSIÓN RATED VOLTAGE  (V)	POTENCIA TÉRMICA THERMAL POWER  VA	POTENCIA ATRACCIÓN INSTANT POWER <i>cosφ=0.5</i> (VA)	Ucc  %	MEDIDAS TRANSFORMADOR TRANSFORMER SIZES (mm)						PESO WEIGHT  (Kg)
					A	B	C	d	e	Fij.	
*125B12NRG	230-400-460//12 ó 24V	25	55	10	66	82	78	50	41	M-4	0,68
*140B12NRG		40	95	9,5	75	85	85	56	48	M-4	1,06
*163B12NRG		63	140	7,8	75	91	85	56	54	M-4	1,33
*210B12NRG		100	225	6,5	84	102	91	64	64	M-4	2,01
*216B12NRG		160	385	4,8	96	105	101	84	76	M-5	2,64
*220B12NRG		200	490	4,5	96	119	101	84	90	M-5	3,43
*225B12NRG		250	690	4,2	108	120	112	81	85	M-5	4,01
*232B12NRG		320	900	4,0	108	134	112	81	99	M-5	5,10
*240B12NRG		400	1300	3,8	120	113	120	90	86	M-5	4,87
*250B12NRG		500	1500	3,7	120	133	125	90	106	M-5	6,50

Figura 10.2. Características transformador 230/24-48V de 25VA

Una vez que obtenemos estos 24V vamos a proceder a la rectificación en onda completa de esta tensión.

Para ello se utilizan cuatro diodos conectados en forma de puente tal como se muestra en la siguiente figura, en la cual durante el semiciclo positivo conducen los diodos  $D_2$  y  $D_3$  y durante el semiciclo negativo conducen los diodos  $D_4$  y  $D_1$ . A la carga le llega una tensión pulsante semisenoidal de onda completa de amplitud igual al pico de la tensión secundaria del transformador:

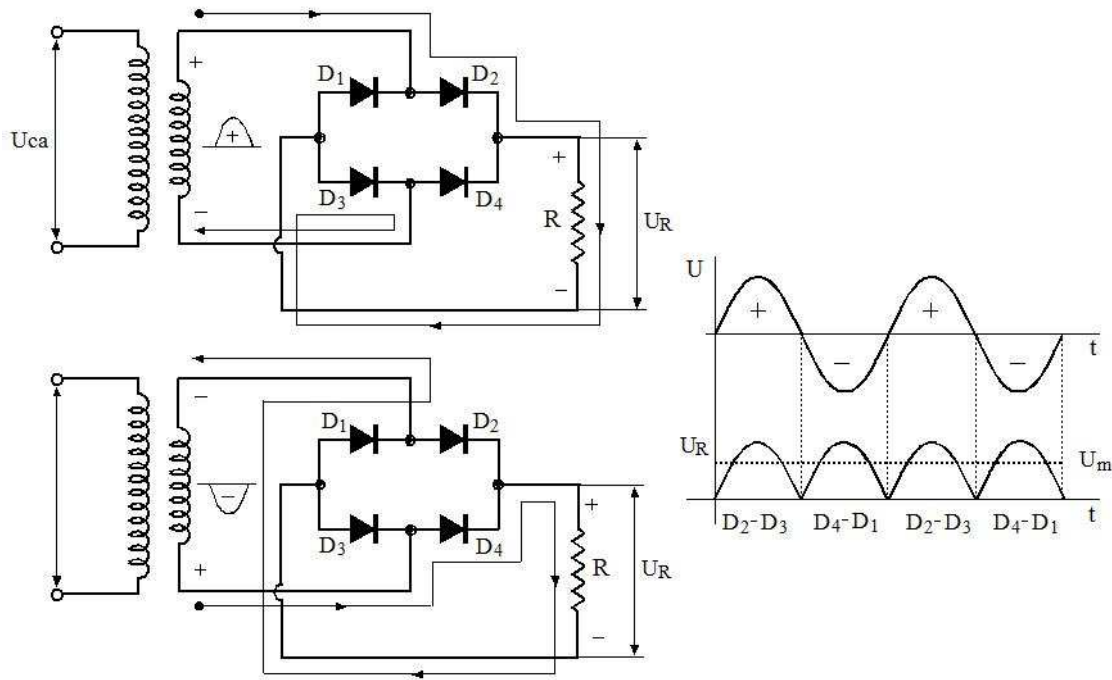


Figura 10.3. Circuito rectificador de onda completa con 4 diodos (Punto Graetz)

### 10.1.2. Filtrado de la tensión pulsante.

Como hemos observado, a la salida del rectificador monofásico anterior obtenemos una onda de tensión semisenoidal pulsante en onda completa. Para proporcionar un cierto nivel de alisado de esta onda pulsante de tensión (filtrado), conectamos a la salida del rectificador un condensador en paralelo con la carga.

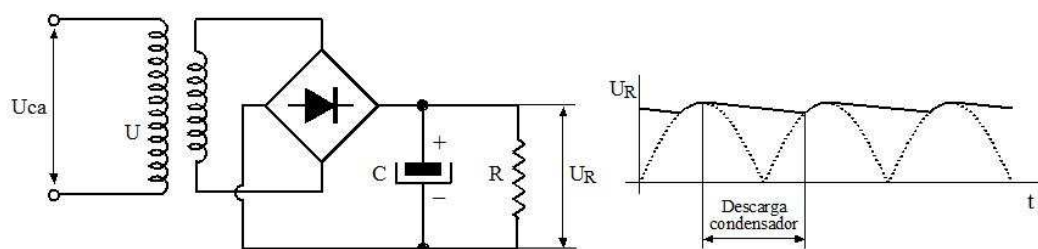


Figura 10.4. Filtrado de la onda pulsante

Al conectar este condensador de filtro, éste se carga en el intervalo  $t_1 - t_2$  y se descarga en el intervalo  $t_2 - t_2 + T/2$ . Esquemáticamente lo podemos explicar a través de la siguiente figura:

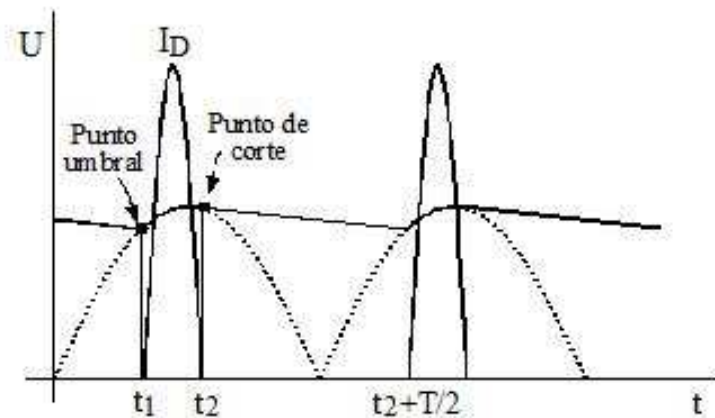


Figura 10.5. Tensión de salida en un rectificador de onda completa con filtro

El punto a partir del cual el diodo comienza a conducir se denomina punto umbral ( $t_1$ ) y el punto en el cual finaliza su conducción se denomina punto de corte ( $t_2$ ). En el intervalo  $t_1 - t_2$  el condensador se carga y el diodo conduce por estar polarizado directamente, mientras que en el intervalo  $t_2 - t_2 + T/2$  el condensador se descarga a través de la resistencia y el diodo deja de conducir debido a que se polariza inversamente; durante este intervalo la tensión en la entrada del puente rectificador se hace inferior a la tensión de salida (tensión en el condensador de filtrado).

Durante el intervalo  $t_2 - t_2 + T/2$  la tensión suministrada a la carga es la que procede del condensador, la cual disminuye exponencialmente debido a su descarga a través de  $R$ , por lo tanto la tensión en dicho intervalo es:

$$V = V(t_2)e^{-\frac{t}{RC}} \text{ para } t_2 \leq t \leq t_2 + T/2; \text{ o lo que es lo mismo: } V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}},$$

siendo la intensidad máxima que suministra el condensador a la carga en este intervalo (ya que el diodo no conduce al estar en inversa);

$$I_{DC\text{máx}} = \frac{24\sqrt{2}V}{8.5\Omega} \approx \frac{33.9V}{8.5\Omega} \approx 3.9A$$

Cabe destacar, que la tensión de salida del filtrado no es totalmente lisa ya que oscila entre un valor máximo ( $U_{\text{máx}}=U_0$ ) y un valor mínimo ( $U_{\text{máx}}=U(t_1)$ ). La diferencia entre la tensión máxima y la mínima se denomina tensión de rizado:

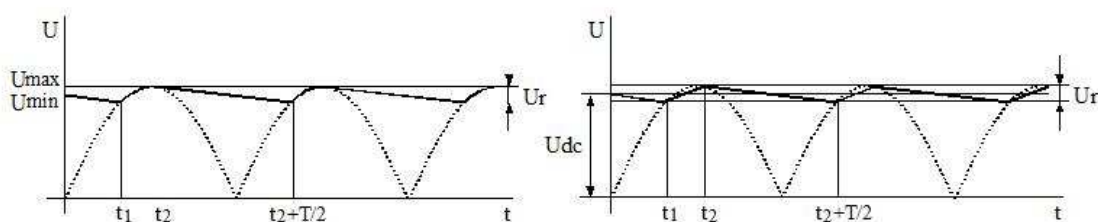


Figura 10.6. Rizado en una tensión rectificadora





En nuestro caso consideraremos que  $V = 80\%V_0$ ; es decir, consideraremos un rizado del 20% ya que este es el peor de los casos y así establecemos un margen de seguridad. Menos de 20% de rizado se considera aceptable.

Para el valor de R establecemos el valor de  $8.5\Omega$  que es el valor de la resistencia en serie de la bobina, y despreciamos su inductancia L. Esto es consecuencia del establecimiento del margen de seguridad en cuanto al rizado (20%) y de las características que nos impone la constante de tiempo de la bobina ( $\tau = L/R$ ); ya que con la carga R nos hallamos por así decirlo en "el peor de los casos".

Es decir, si sólo consideramos el valor de R la descarga de la corriente (o la caída de la corriente) será más rápida y por consiguiente la tensión bajará a un valor de tensión más bajo ( $V_{min}$ ) en el intervalo  $t_2 - t_2 + T/2$  que si tuviéramos la carga R-L; observando por tanto un mayor rizado que en este caso. Ya que en el caso de la carga R-L la condición impuesta por la  $\tau$  frena la corriente y por consiguiente la descarga de tensión en el intervalo  $t_2 - t_2 + T/2$  bajará a un valor de tensión más alto que en el caso de la carga R; teniendo menor rizado.

A la vista de esto podemos establecer que si con la carga R tenemos máximo un 20% de rizado, lo cual es un valor aceptable, con la carga R-L aseguramos que será menor a todos los efectos. Estamos garantizando ese margen de seguridad antes mencionado.

Llegados a este punto, estamos en condiciones de establecer los valores para el condensador y los diodos.

Para la elección del condensador consideramos que el tiempo de descarga del condensador (intervalo  $t_2 - t_2 + T/2$ ) es igual a 10ms. Esto es debido a que la frecuencia de operación de la tensión suministrada por la red es igual a 50 Hz; por tanto el período es igual a 1/50 que son 20ms siendo el semiperíodo de la onda los 10 ms que consideramos en este tiempo de descarga del condensador. Partimos de la fórmula de la tensión suministrada a la carga en el intervalo  $t_2 - t_2 + T/2$ , la cual procede del condensador y disminuye exponencialmente debido a su descarga a través de la resistencia; por tanto resulta:

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}} \Rightarrow \frac{V}{V_0} = e^{-\frac{t}{RC}} \Rightarrow -\frac{t}{RC} = \ln \frac{V}{V_0}$$

$$C = -\frac{t}{R \ln \frac{V}{V_0}} ; \quad \text{considerando } V = 80\%V_0 = \frac{80}{100} \times 24\sqrt{2}$$

$$C = -\frac{10 \times 10^{-3}}{8.5 \ln 0.8} = 5 \times 10^{-3} \Rightarrow C = 5272.258 F \approx 5 mF$$

El valor de la capacidad da como resultado 5mF. Debemos tener en cuenta que a la hora de la elección del condensador, este tiene que tener un valor normalizado de tal forma que podamos adquirir el componente para luego acoplarlo en nuestro diseño. Para ello éste tiene que cumplir las condiciones que hemos establecido.

Para escoger un valor normalizado buscamos en los catálogos existentes para adquirir condensadores, teniendo en cuenta que es electrolítico; optamos por escoger un valor para C de 10mF/40V (ya que máximo aguantará la tensión de pico que son  $24\sqrt{2} \approx 34V$ ). Existen muchos fabricantes que suministren este tipo de condensador pero por establecer uno en cuestión: *CE-10000/40PHS*; del fabricante: *F&T*. Sus principales características son las que se expresan en el siguiente cuadro la figura 10.7. (la indicada con la elipse):

Símbolo	Cap. [mF]	Imp. [mΩ]	Tens. trabajo [V]	Dimens. de cuerpo [mm]	Ráster de term. [mm]
<a href="#">CE-4700/63PHS</a>	4,7	50	63	Ø35 x 50	10
<a href="#">CE-10000/40PHS</a>	10	40	40	Ø35 x 60	10
<a href="#">CE-10000/63PHS</a>	10	30	63	Ø35 x 66	10
<a href="#">CE-10000/100PHS</a>	10	40	100	Ø40 x 95	20

Figura 10.7. Características principales del condensador de filtro

Para explicar el filtrado de la tensión pulsante hemos establecido que para el intervalo  $t_2 - t_2 + T/2$  la tensión suministrada a la carga es la que procedía del condensador la cual disminuía exponencialmente; pero no hemos hecho hincapié en el intervalo  $t_1 - t_2$  en el que el condensador se carga y el diodo conduce por estar polarizado directamente.

Durante el intervalo  $t_1 - t_2$  la tensión suministrada a la carga será la procedente de la salida del transformador (despreciando la caída de tensión de los diodos); es decir:

$$V = V_0 \sin \omega t \text{ para } t_1 \leq t \leq t_2$$

La corriente que circula por el diodo en el intervalo  $t_1 - t_2$  viene dada por la suma de la corriente de la carga  $i_R$  y la del condensador  $i_C$ . Se deduce que el valor de dicha corriente es:

$$i_D = i_R + i_C = I_{0D} \sin(\omega t + \phi)$$

$$\text{Donde: } I_{0D} = \frac{V_0}{R} \sqrt{(\omega RC)^2 + 1}$$

$$\phi = \arctg \omega RC$$

De la ecuación  $\phi = \arctg \omega RC$  se deduce que si se utilizan grandes capacidades en el filtrado para mejorar el alisado de la tensión, entonces los picos de corriente a través de los diodos ( $I_{OD}$ ) se hacen muy elevados, mientras que el tiempo de conducción ( $t_1 - t_2$ ) disminuye. Por lo tanto el empleo de capacidades elevadas en los filtros provoca grandes picos de corriente a través de los diodos.

Por tanto para la elección de nuestros diodos deberemos tener en cuenta el valor de dicha corriente de pico, la cual debemos calcular. Cabe destacar, revisando la hoja de características de los diodos; que este valor de corriente de pico corresponde con el pico de corriente directa no repetitivo (non-repetitive peak forward surge current) que es la máxima corriente de pico que puede soportar el diodo durante un intervalo de tiempo muy breve (del orden de ms). Ya que en las características de un diodo nos encontramos con la corriente directa en régimen permanente (*Average Rectified Forward Current*) bien diferenciado con el pico de corriente directa no repetitivo (*Nonrepetitive Peak Surge Current*). En base al pico de corriente directa no repetitivo, elegiremos el diodo. Una vez establecida esta aclaración, calculamos:

$$I_{OD} = \frac{V_0}{R} \sqrt{(\omega RC)^2 + 1} = \frac{24\sqrt{2}}{8.5} \sqrt{(2\pi 50 \times 8.5 \times 10 \times 10^{-3})^2 + 1} = 106.7 A$$

$$\phi = \arctg \omega RC = \arctg(2\pi 50 \times 8.5 \times 10 \times 10^{-3}) = 87.85^\circ$$

$$\text{Resultándonos: } I_{OD} = 106.7 \text{ sen}(100\pi + 87.85^\circ)$$

Es decir, la elección de nuestros diodos rectificadores tendrá la característica de un pico de corriente directa no repetitivo de 106.7A; y en base a esta característica elegiremos el diodo. Optamos por escoger un diodo de 4 A cuya corriente de pico directa no repetitiva es de 125A. Buscando en catálogos existen un amplio abanico de posibilidades en cuanto a diodos normalizados que cumplan con estas características. Por establecer uno en concreto podemos optar por el modelo: *MUR410RLG*; del fabricante *ON Semiconductor*. Sus parámetros característicos son los que se muestran a continuación (extraído de su *datasheet* u hoja de características):

#### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	MUR						Unit
		405	410	415	420	440	460	
Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	$V_{RRM}$ $V_{RWM}$ $V_R$	50	100	150	200	400	600	V
Average Rectified Forward Current (Square Wave) (Mounting Method #3 Per Note 2)	$I_{F(AV)}$	4.0 @ $T_A = 80^{\circ}\text{C}$				4.0 @ $T_A = 40^{\circ}\text{C}$		A
Nonrepetitive Peak Surge Current (Surge applied at rated load conditions, half wave, single phase, 60 Hz)	$I_{FSM}$	125				110		A
Operating Junction Temperature & Storage Temperature	$T_J, T_{sta}$	- 65 to +175						$^{\circ}\text{C}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

Figura 10.8. Características principales de los diodos rectificadores

## 10.2. Etapa de control.

Esta etapa de control consta de varios bloques formados por distintos componentes electrónicos. Iremos analizando uno a uno conforme avancemos en el apartado para luego encadenar todos los bloques en uno sólo; analizando todas las partes individuales encadenadas como un “todo”. Es decir, de dicho “todo” entenderemos el análisis de cada una de sus partes para comprenderlo en su totalidad.

### 10.2.1. Primer bloque: Multivibrador astable con el LM555.

Antes de analizar el bloque del multivibrador astable con el LM555, vamos a analizar el temporizador LM555.

El temporizador LM555 es un dispositivo integrado diseñado para el control de tiempos de precisión, tales como la producción de retardos de tiempo, generación de impulsos, modulación de anchura de pulsos, etc. El integrado consta de 8 patillas tal como se muestra en la figura 10.9.:

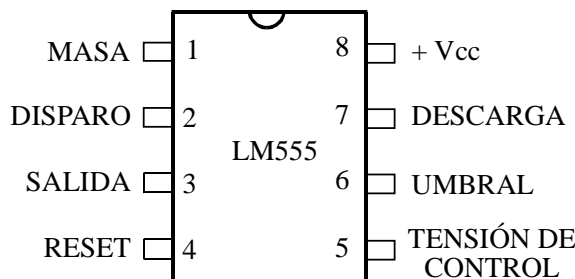


Figura 10.9. Circuito integrado LM555

Esta es la visión externa del componente integrado. Para poder llegar a comprender la composición interna o estructura interna debemos conformar el esquema simplificado del temporizador LM555; con su correspondiente denominación de los pines.

El esquema simplificado lo mostramos a continuación, denominando y explicando de forma simplificada cada una de las correspondientes patillas o pines del componente integrado.

De esta forma tenemos una idea aproximada de su composición, ya que a la hora de conformar el bloque del multivibrador astable con el LM555 como veremos más adelante; hay que tener en cuenta elementos como el transistor conectado internamente para no llegar a quemar el integrado. Todo esto será especificado en su correspondiente apartado. Analicemos cada una de las patillas de las que se compone:

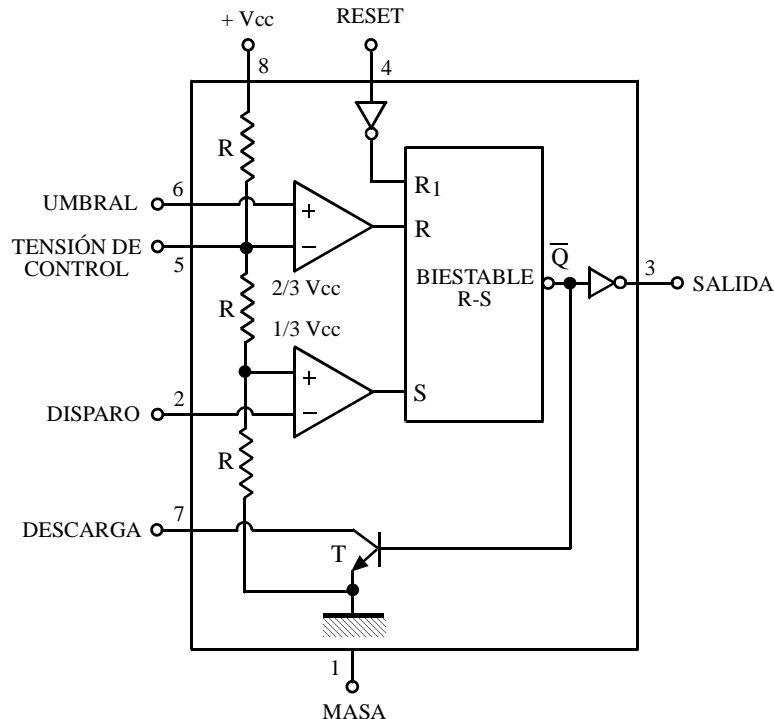


Figura 10.10. Esquema simplificado del LM555

**MASA (1):** Es el terminal que se conecta al negativo de la fuente de alimentación.

**+Vcc (8):** Es el terminal que se conecta al positivo de la fuente de alimentación. Su tensión puede estar comprendida entre 4,5 V y 16 V, sin embargo hay versiones para aplicaciones militares o aeroespaciales que pueden llegar hasta 18 V. Cuando el integrado se alimenta a 15 V y está en funcionamiento de reposo su consumo es 10 mA.

**SALIDA (3):** La salida puede estar a nivel alto (1) o a nivel bajo (0) y la corriente máxima que puede suministrar o absorber es de 200 mA. Cuando se encuentre a nivel alto su tensión de salida será la de alimentación Vcc menos una caída de tensión que será del orden de 1,7 V cuando suministre 100 mA y del orden de 2,5 V cuando suministre 200 mA. Cuando se encuentre a nivel bajo su tensión de salida será del orden de 2 V cuando absorba 100 mA y del orden de 2,5 V cuando absorba 200 mA.

**RESET (4):** Cuando se conecta a cero voltios, o incluso a una tensión inferior a 0,7 V, entonces el pin de salida se pone a nivel bajo. Cuando esta patilla no se utiliza hay que conectarla a Vcc para evitar que se produzcan acciones de reset por problemas de ruido electromagnético.

**TENSIÓN DE UMBRAL (6):** Si la tensión de umbral supera los  $\frac{2}{3}$  de la tensión de alimentación, el pin de salida se sitúa a nivel bajo (para que funcione de este modo la tensión de control no debe conectarse a ningún nivel de tensión). En definitiva, cuando la tensión de umbral se pone a uno la salida se pone a bajo.

**DISPARO (2):** Si la tensión de disparo cae por debajo de  $1/3$  de la tensión de alimentación, el pin de salida se pone a uno. El pulso aplicado al pin de disparo debe tener una duración inferior al tiempo programado a la salida, ya que si se mantiene a nivel bajo por un tiempo superior, la salida quedará a nivel alto hasta que la entrada de disparo vuelva a ponerse a nivel alto de nuevo (para que funcione de este modo la tensión de referencia no debe conectarse a ninguna tensión). En definitiva, cuando la tensión de disparo pasa a ser la salida se pone a uno.

**DESCARGA (7):** Este pin se utiliza para producir la descarga completa del condensador externo que se utiliza para fijar la base de tiempos del temporizador.

**TENSIÓN DE CONTROL (5):** Cuando el temporizador se utiliza en el modo de control de tensión se pueden variar los tiempos de salida en estado alto y bajo actuando sobre la tensión de control. Esta tensión puede variar desde  $1,7\text{ V}$  hasta  $V_{cc} - 1\text{ V}$ . Cuando esta patilla no se utiliza se recomienda conectarla a un condensador de  $100\text{ nF}$  para evitar que el ruido electromagnético introduzca valores de tensión en dicha patilla.

Una vez analizado el temporizador LM555, ya podemos entrar en detalle en el análisis del multivibrador astable formado por el LM555. Un circuito astable es aquel que tiene dos estados que se repiten periódicamente de forma indefinida. La salida permanece en estado uno durante un tiempo  $T_1$  y en estado cero durante un tiempo  $T_2$ . El diseño de un multivibrador astable con el LM 555 es el que se muestra en la figura 10.11.

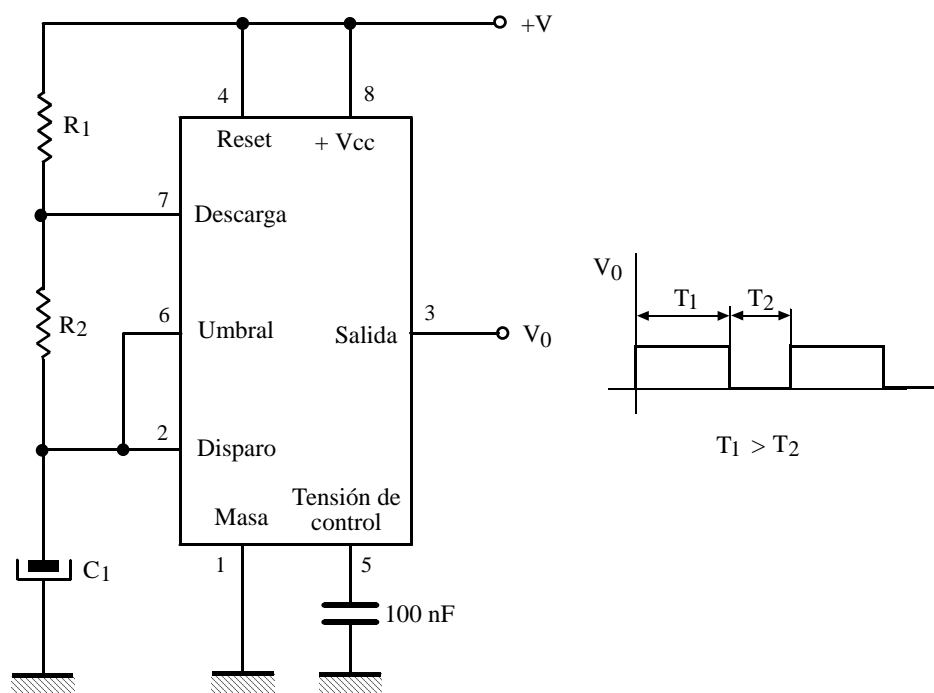


Figura 10.11. Circuito multivibrador astable con el LM555



La salida permanece a nivel alto durante un tiempo  $T_1$  durante el cual el condensador  $C_1$  se carga y permanece a nivel bajo durante un tiempo  $T_2$  durante el cual el condensador  $C_1$  se descarga.

Dichos tiempos vienen dados por las expresiones:

$$T_1 = (R_1 + R_2)C_1 \ln 2 \Rightarrow T_1 \approx 0.693(R_1 + R_2)C_1 \quad (1)$$

$$T_2 = R_2C_1 \ln 2 \Rightarrow T_2 \approx 0.693R_2C_1 \quad (2)$$

El período de oscilación vendrá dado por:

$$T = T_1 + T_2 = 0.693(R_1 + 2R_2)C_1$$

Según se deduce de las expresiones (1) y (2); el tiempo de permanencia en estado alto es mayor que el estado de permanencia en estado bajo ( $T_1$  mayor que  $T_2$ ).

Por tanto, la frecuencia de oscilación vendrá dada por:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C_1}$$

En este punto, ya estamos en condiciones de la elección de los valores para las resistencias así como de los condensadores.

Como ya hemos expuesto en el apartado de la etapa de potencia, una vez asentadas las bases para poder realizar los cálculos procederemos a la elección de los distintos componentes, ya sean condensadores o resistencias entre otros; a través de las hojas de características suministradas por los fabricantes y en base a ellas reflexionaremos si son las mas convenientes para el diseño y construcción de nuestro dispositivo electrónico.

Para la elección del condensador de la patilla número cinco (tensión de control) optamos por el condensador de 100 nF; ya que como esta patilla no la utilizamos; introducimos este condensador para evitar que el ruido electromagnético inserte valores de tensión en dicha patilla (como ya habíamos comentado).

Para elegir un condensador en particular a la hora de conformar el circuito podemos optar por el modelo: *MKS2 Polyester Cap, 63V, 0.1uF*; del fabricante *WIMA*. Sus características tanto de capacidad como de tensión soportada son suficientes para poder acoplarlo a nuestro circuito. Sus características generales extraídas de su hoja de características para la serie *MKS2* son las que tenemos a continuación en la figura 10.12.



# Technical Data / General Data

Dielectric: Polyethylene terephthalate film.  
Capacitor electrodes: Vacuum-deposited aluminium.  
Encapsulation: Flame retardant plastic case,  
UL 94 V-0, with epoxy resin seal.  
Colour: Red. Marking: White.  
Temperature range: -55° C to +100° C.  
Test specifications: In accordance with  
IEC 60384-2 and EN 130400 (u. prep.).  
Test category: 55/100/21 in accordance with IEC.  
Insulation resistance at +20° C:

U <sub>r</sub>	U <sub>test</sub>	C ≤ 0.33 μF	0.33 μF < C ≤ 10 μF
16 VDC	10 V	≥ 3.75 × 10 <sup>3</sup> MOhms Mean value: 1 × 10 <sup>4</sup> MOhms	≥ 1000 sec. (MOhms × μF) Mean value: 3000 sec.
50 VDC	10 V	≥ 5 × 10 <sup>3</sup> MOhms Mean value: 3 × 10 <sup>4</sup> MOhms	≥ 1000 sec. (MOhms × μF) Mean value: 3000 sec.
63 VDC	50 V	≥ 1 × 10 <sup>4</sup> MOhms Mean value: 5 × 10 <sup>4</sup> MOhms	≥ 3000 sec. (MOhms × μF) Mean value: 8000 sec.
≥ 100 VDC	100 V	≥ 1.5 × 10 <sup>4</sup> MOhms Mean value: 1 × 10 <sup>5</sup> MOhms	≥ 5000 sec. (MOhms × μF) Mean value: 10000 sec.

In accordance with IEC 60384-2 and

Maximum pulse rise time:

Capacitance μF	Pulse rise time V/μsec max. operation/test					
	16 VDC	50 VDC	63 VDC	100 VDC	250 VDC	400 VDC
0.01...0.022	25/250	-	35/350	35/350	50/500	80/800
0.033...0.068	15/150	-	20/200	25/250	50/500	80/800
0.1...0.47	10/100	-	15/150	20/200	50/500	80/800
0.68...1.0	7.5/75	-	12/120	15/150	-	-
1.5...3.3	5/50	8/80	7.5/75	-	-	-
4.7	4/40	5/50	-	-	-	-
6.8...10	3/30	-	-	-	-	-

for pulses equal to the rated voltage.

Vibration: 6 hours at 10...2000 Hz and 0.75 mm displacement  
amplitude or 10 g in accordance  
with IEC 60068-2-8.

Low air density: 1 kPa = 10 mbar in accordance  
with IEC 60068-2-13.

Bump test: 4000 bumps at 390 m/sec<sup>2</sup> in accordance with  
IEC 60068-2-29.

Voltage derating: A voltage derating factor of 1.25% per K  
must be applied from +85° C for DC voltages and from +75° C  
for AC voltages.

Figura 10.12. Características principales del condensador de 100nF

En cuanto al condensador electrolítico que conectamos en la patilla número dos, (que está cortocircuitada a su vez con la patilla número seis, tensión umbral) la referente a la tensión de disparo, fijamos su valor en 1μF. Esto es así debido a que en los cálculos para hallar los valores de  $R_1$  y  $R_2$ , los cuales desarrollaremos a continuación; se hace necesario fijar un valor para dicho condensador. Para este condensador elegimos el modelo: *Condens electro Al radial M, 1uF 100V*, del fabricante *Panasonic*. Observándose que tanto sus características de tensión como de capacidad son aptas para nuestro diseño. En lo referente a sus características generales:

## Specifications

Operating temperature range	-40 to +85°C							-25 to +85°C							
Rated working voltage	6.3 to 100 V DC							160 to 450 V DC							
Nominal capacitance range	0.1 to 22000 μF							1.0 to 470 μF							
Capacitance tolerance	±20% (120 Hz/+20°C)														
DC leakage current	I ≤ 0.03 CV or 4 (μA) after 1 minute I ≤ 0.01 CV or 3 (μA) after 2 minutes							(Which ever is greater)	I ≤ 0.06 CV + 10 (μA) after 2 minutes						
tan δ	(120 Hz/+20°C)														
	W.V. (V)	6.3	10	16	25	35	50	63	100	160	200	250	350	400	450
	tan δ	0.28	0.24	0.20	0.16	0.14	0.12	0.11	0.10	0.16	0.18	0.18	0.20	0.20	0.20
	Add 0.02 per 1,000 μF for products of 1,000 μF or more.														
Characteristics at low temperature	Impedance ratio at 120 Hz														
	W.V. (V)	6.3	10	16	25	35	50	63	100	160	200	250	350	400	450
	Z (-25°C) / Z (+20°C)	5	4	3	2	2	2	2	2	2	2	3	5	6	6
	Z (-40°C) / Z (+20°C)	12	10	8	5	4	3	3	3	—	—	—	—	—	—
	(1) Add 0.5 per 1,000 μF for products of 1,000 μF or more at -25°C (2) Add 1.0 per 1,000 μF for products of 1,000 μF or more at -40°C														
Endurance	After applying working voltage for 2,000 hours at +85°C and then being stabilized at +20°C, capacitor shall meet the following limits.														
	Capacitance change	±20% of initial measured value (±3.5 ±25%)													
	tan δ	≤ 150% of initial specified value													
	DC leakage current	≤ initial specified value													
Shelf life	After storage for 1,000 hours at +85°C with no voltage applied then being stabilized at +20°C, capacitor shall meet the limits specified in "Endurance."														

Figura 10.12. Características principales del condensador de 1uF

Como ya hemos analizado anteriormente, la forma de onda a la salida del temporizador LM555 es tal como se muestra a continuación en la figura 10.13.:

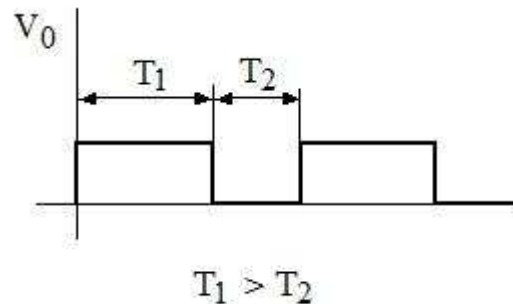


Figura 10.13. Forma de onda a la salida del temporizado LM555

Para garantizar la carga de la bobina definíamos la constante de tiempo  $\tau$ ; alcanzando la bobina su máxima corriente cuándo  $t = 4 \times \tau$ . Según deducíamos de las expresiones (1) y (2); el tiempo de permanencia en estado alto es mayor que el estado de permanencia en estado bajo ( $T_1$  mayor que  $T_2$ ).

Por tanto fijamos para el período  $T_2$  el valor de  $4\tau$  ya que es el tiempo necesario para poder garantizar la carga de la bobina a los 4 amperios de pico ( $I_0$ ) para su correcto funcionamiento (ya que como veremos en el siguiente bloque del inversor, invertiremos el valor de esta onda siendo el  $T_{OFF}$  de la salida del LM555 el Ton de la onda resultante a la salida del inversor), es decir, el valor de  $T_2$  va a ser fijo y el que va a hacer modificar el período va a ser el valor de  $T_1$ :

$$T_2 = 4\tau = 11.7ms \approx 12ms \Rightarrow T_2 = 12ms$$

La frecuencia máxima de operación de nuestro circuito R-L, el cuál a través del diseño completo de nuestro dispositivo electrónico queremos controlar; resultaba ser como vimos en apartados anteriores de 42.51Hz. Asimismo debemos establecer una frecuencia mínima de operación, la cuál vamos a establecer en 5Hz. Por tanto:

$$f_{\min} = 5Hz \Rightarrow T_{\max} = 200ms$$

$$\text{Así pues; } T_{1\max} = T_{\max} - T_2 = 200ms - 12ms = 188ms \approx 200ms$$

En base a las expresiones de  $T_1$  y  $T_2$  establecidas para el multivibrador astable con el LM555 podemos hallar el valor de las



resistencias  $R_1$  y  $R_2$  que harán el valor de  $T_1$  máximo y por consiguiente del período  $T$  :

$$T_2 = R_2 C_1 \ln 2 \Rightarrow R_2 = \frac{T_2}{10^{-6} \times \ln 2} = 17.312 K\Omega \Rightarrow R_2 \approx 18 K\Omega$$

Tomando este valor de  $R_2 = 18 K\Omega$  ; el período  $T_2$  resulta:

$$T_2 = R_2 C_1 \ln 2 = 18 \times 10^3 \times 10^{-6} \times \ln 2 = 12.47 ms$$

En lo referente a  $T_{1máx}$  :

$$T_{1máx} = (R_1 + R_2) C_1 \ln 2 \Rightarrow 0.2 = (R_1 + 18 \times 10^3) \times 10^{-6} \times \ln 2 \Rightarrow R_1 = 270.539 K\Omega$$

$$R_1 \approx 270 K\Omega$$

Tomando este valor de  $R_1 = 270 K\Omega$  ; el período  $T_{1máx}$  resulta:

$$T_{1máx} = (R_1 + R_2) C_1 \ln 2 = (270 \times 10^3 + 18 \times 10^3) \times 10^{-6} \times \ln 2 \Rightarrow T_{1máx} = 199.6 ms$$

A la vista de lo expuesto, el período  $T_{1máx}$  que hace que el período total sea máximo lo conseguimos a través de la suma de resistencias  $R_1$  y  $R_2$ . Como ya hemos explicado antes, el período total de la onda lo modificamos según sea el valor de  $T_1$  mayor o menor. Sabiendo que el valor mínimo de  $T_1$  son  $4\tau$  para poder garantizar la descarga (como hemos dicho antes, el inversor del siguiente bloque hará que Ton pase a ser el tiempo en estado bajo o  $T_{OFF}$ ), modificaremos  $T_1$  en función del valor que adopte la resistencia que interviene en la fórmula citada anteriormente (1):

- Si  $R_1 = 270 K\Omega$ , obtenemos  $T_{1máx}$  y por consiguiente el período total máximo:

$$T_{1máx} = 0.693(R_1 + R_2) C_1 = 199.6 ms \Rightarrow T_{máx} = T_{1máx} + T_2 = 212.07 ms \Rightarrow f_{mín} \approx 5 Hz$$

- Si  $R_1 = 0 K\Omega$ , obtenemos  $T_{1mín}$  y por consiguiente el período total mínimo:

$$T_{1mín} = 0.693(R_1 + R_2) C_1 = 12.47 ms \Rightarrow T_{mín} = T_{1mín} + T_2 = 24.94 ms \Rightarrow f_{máx} = 40.03 Hz$$

Por tanto la frecuencia a la que va a operar nuestra bobina en serie con la resistencia va a variar, en la práctica, desde 5 Hz hasta 40 Hz.

Por tanto y en vista a los resultados mostrados, la resistencia  $R_1$  (conectada entre los pines 4 y 7) de nuestro dispositivo integrado resultará



ser un potenciómetro de  $270K\Omega$  con el cual variaremos el período total de la onda resultante.

Cabe destacar que necesitamos conectar una resistencia, en serie con el potenciómetro de  $270K$ , de  $560$  ohmios. Esto es debido a que si nos fijamos en el esquema simplificado del LM555, en la patilla 7 tenemos internamente conectado un transistor.

Por tanto en el caso de que el potenciómetro valga  $0$  (obteniendo el período total mínimo) y cuando se produjera la descarga del condensador externo (que nos fija la base de tiempos, conectado a ésta patilla 7) nos encontramos un cortocircuito desde la tensión de alimentación de  $9$  Voltios hasta la patilla de colector del transistor, haciendo que este se pueda llegar a quemar y hacer que deje de funcionar el temporizador LM555.

De ahí que utilicemos esta resistencia para limitar la corriente de colector del transistor y así evitar que nuestro temporizador deje de funcionar. Este valor de resistencia apenas influye en los cálculos de los tiempos ya que es una resistencia mucho menor en comparación de la resistencia de  $18K$ .

El período total máximo y el mínimo quedarían:

$$T_{1máx} = 0.693(R_1 + R_2)C_1 = 199.9ms \Rightarrow T_{máx} = T_{1máx} + T_2 = 212.44ms$$

$$T_{1mín} = 0.693(R_1 + R_2)C_1 = 12.86ms \Rightarrow T_{mín} = T_{1mín} + T_2 = 25.33ms$$

A la hora de elegir una referencia comercial nos bastaría con elegir una resistencia de  $560$  ohmios (valor normalizado), con una potencia nominal de  $0.5$  W y una tolerancia del  $5\%$ .

### **10.2.2. Segundo bloque: Transistor trabajando en modo de conmutación. Circuito inversor.**

Este segundo bloque está formado por un transistor haciéndolo trabajar en modo de conmutación. Antes de entrar en detalle en este bloque, es necesario realizar un breve estudio acerca del transistor bipolar.

EL transistor bipolar fue inventado a finales de  $1947$  y luego en  $1949$  fue mejorado por Schokley; el cual es un dispositivo semiconductor formado por dos uniones PN muy próximas entre sí y dispuestas en oposición. También recibe el nombre de transistor bipolar de unión (BJT, bipolar junction transistor).

Los transistores bipolares se forman mediante tres capas de material semiconductor, y según la disposición de las mismas pueden ser de dos tipos: NPN o PNP. La capa central recibe el nombre de base y las capas externas se denominan emisor y colector. En la siguiente figura se

muestran las disposiciones de capas y el símbolo de cada uno de los dos tipos de transistores:

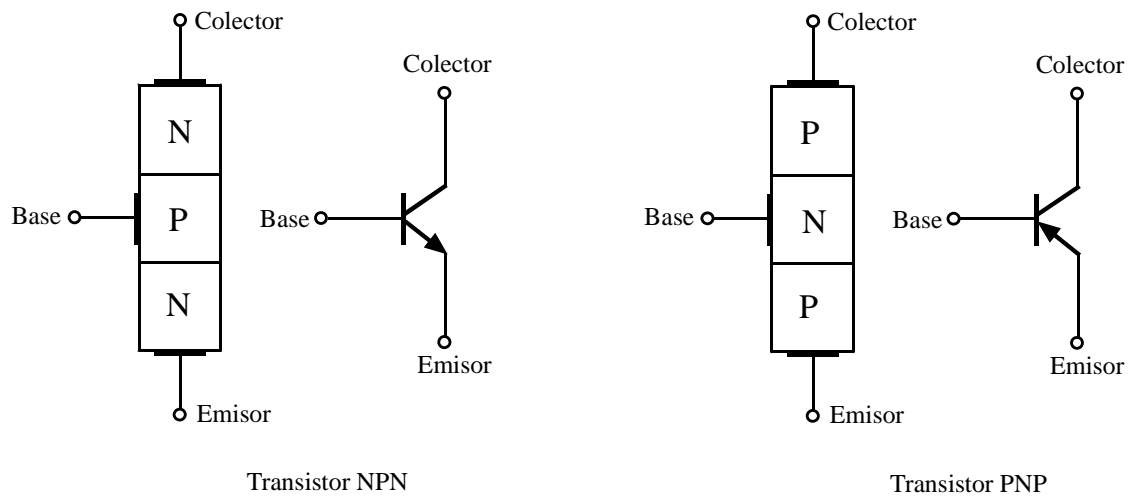


Figura 10.14. Transistores NPN y PNP (disposición de las capas semiconductoras y símbolos)

En un transistor circulan tres corrientes, la corriente de emisor ( $I_E$ ), la corriente de base ( $I_B$ ) y la corriente de colector ( $I_C$ ). Como el emisor es la fuente de electrones en el transistor NPN, su corriente es la mayor de las tres y como casi todos los electrones se dirigen hacia el colector, su corriente es prácticamente igual a la del emisor (ligeramente inferior). Por lo tanto la corriente de la base es muy pequeña comparada con las otras dos.

El transistor posee cuatro zonas o modos de funcionamiento según las polarizaciones de las uniones PN:

- **Zona activa:** Corresponde a la zona de funcionamiento más importante del transistor. En esta zona la mayor parte de electrones que inyecta el emisor en la base son recogidos por el colector y por ese motivo los cambios de tensión entre colector y emisor prácticamente no influyen en la corriente de colector. Dentro de la zona activa podemos distinguir entre:

**Activa directa:** El BJT actúa como amplificador de intensidad:  $I_C = \beta_F I_B$  con  $\beta_F \approx 100$ .

**Activa inversa:** El BJT actúa igualmente como amplificador de intensidad:  $I_E = -\beta_R I_C$  con  $\beta_R \approx 1$ .

- **Zona de saturación:** Corresponde a la parte en que la corriente de colector crece rápidamente y se produce para tensiones  $U_{CE}$  comprendidas entre 0 V y aproximadamente 1 V. Es decir, La ganancia en intensidad decae notablemente y la tensión entre C y E es muy baja.

- **Zona de corte:** Corrientes muy bajas entre los tres terminales.

Estas cuatro zonas de funcionamiento las podemos distinguir en la curva característica del transistor:

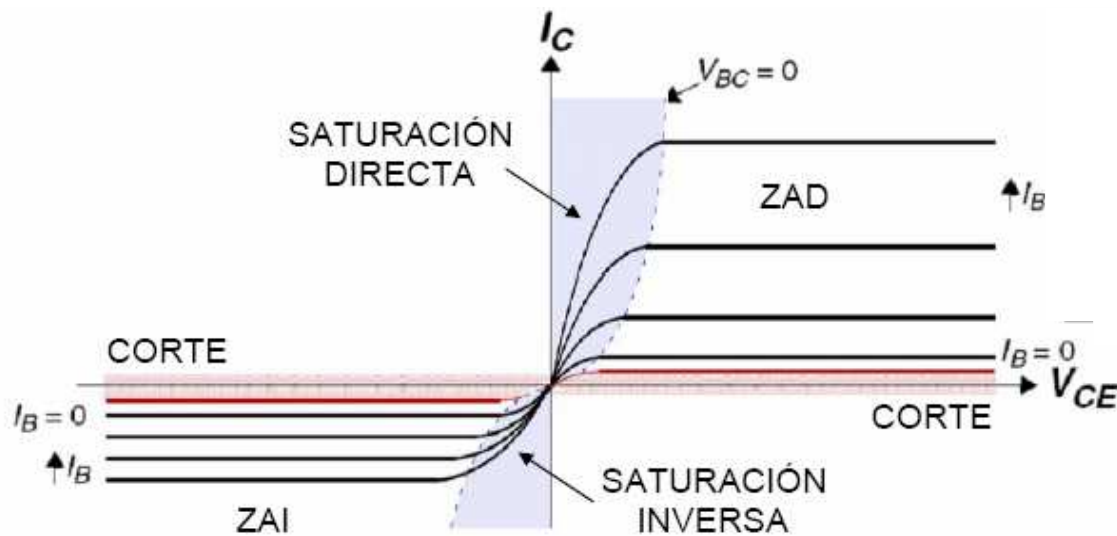


Figura 10.15. Curva característica del transistor

Para el diseño de circuitos electrónicos mediante transistores, los fabricantes proporcionan en sus hojas de características una serie de parámetros que determinan el comportamiento de los mismos. Dichos parámetros suelen estar referidos a una temperatura de funcionamiento de 25° C. Algunos de los parámetros más importantes son los siguientes:

### **1.- Corriente de colector en continua: $I_C$**

Es la máxima corriente de colector que puede soportar el transistor para que no se deteriore.

### **2.- Corriente de base: $I_B$**

Es la máxima corriente que puede soportar el diodo base-emisor en polarización directa.

### **3.- Potencia disipada por el colector: $P_C$**

La potencia que disipa el transistor viene dada por el producto de la tensión de colector-emisor por la corriente de colector.

$$P_C = V_{CE} \cdot I_C$$

La potencia que disipa el transistor siempre deberá estar por debajo de su potencia nominal que proporciona el fabricante.



#### **4.- Ganancia de corriente en continua: $h_{FE}$**

Es la relación entre la corriente de colector y la corriente de base para una tensión entre colector-emisor determinada. Este parámetro es muy variable ya que depende de la corriente que circula por el colector, de la temperatura y del proceso de fabricación. Los fabricantes en sus hojas de características indican la ganancia mínima garantizada y la ganancia máxima que puede llegar a alcanzar.

#### **5.- Tensión colector-emisor con la base abierta: $V_{CEO}$**

Es la máxima diferencia de potencial que puede soportar un transistor entre colector y emisor. Si se supera dicha tensión se produce la ruptura de la unión PN formada por el colector y la base, y el transistor queda dañado irreversiblemente.

#### **6.- Tensión emisor-base: $V_{EBO}$**

Es la máxima tensión que soporta la unión base-emisor cuando se polariza inversamente (suele ser de unos pocos voltios, del orden de 5 V a 7 V).

#### **7.- Tensión colector-base: $V_{CBO}$**

Es la máxima tensión que soporta la unión base-colector cuando se polariza inversamente.

#### **8.- Tensión colector-emisor en saturación: $V_{CE(sat)}$**

Es la caída de tensión que se produce entre colector y emisor cuando el transistor trabaja en la zona de saturación. Su valor suele estar comprendido en torno a 1 V.

Por último, podemos establecer una clasificación de los transistores bipolares en función de la potencia que pueden llegar a disipar. Éstos son:

##### **a) Transistores de potencia:**

Son los que pueden disipar potencias del orden de 100 W y admiten corrientes de colector elevadas (del orden de 20 A); sin embargo estos transistores tienen ganancias pequeñas (entre 15 y 20). Por ejemplo el transistor 2N3055 es un transistor NPN que puede disipar una potencia de 115 W a 25 °C, admite una corriente de colector de 15 A y su ganancia está comprendida entre 20 y 70 para  $I_C = 4$  A y  $U_{CE} = 4$  V. Si la corriente de colector aumenta, la ganancia disminuye considerablemente.

##### **b) Transistores de media potencia:**

Su potencia suele estar comprendida entre 3 W y 25 W, y la intensidad de colector puede oscilar entre 1 A y 5 A; su ganancia es del orden de 30 o 40. Por ejemplo, el transistor BD139 es un transistor NPN



que puede disipar una potencia de 12,5 W a 25° C, admite una corriente de colector de 1,5 A y su ganancia mínima es 25 para  $I_C = 5 \text{ mA}$  y  $U_{CE} = 2 \text{ V}$ .

### c) Transistores de baja potencia:

La potencia máxima es del orden de 1 W, e incluso pueden tener potencias por debajo de 250 mW. La intensidad de colector suele ser inferior a los 200 mA y su ganancia puede ser muy elevada (entre 100 y 300). Por ejemplo, el transistor BC547 es un transistor NPN que puede disipar una potencia de 500 mW a 25° C, admite una corriente de colector de 100 mA y su ganancia puede estar comprendida entre 110 y 300.

Una vez que ya conocemos el funcionamiento del transistor bipolar (BJT); podemos entrar en detalle en el diseño del segundo bloque que conforma nuestro dispositivo electrónico: un circuito inversor. Un transistor trabajando en modo de conmutación constituye un circuito inversor, ya que cuando la tensión de entrada es  $U_e = 0 \text{ V}$  (cero lógico) la tensión en el colector es  $U_0 = +U$  (uno lógico) y cuando la tensión de entrada es  $U_e = +U$  (uno lógico), la tensión en el colector es  $U_0 = 0$  (cero lógico). Es decir, el BJT se comporta como un interruptor (estructura inversora); trabajando en saturación ( $U_e = +U$ ;  $U_0 = 0$ ) y corte ( $U_e = 0 \text{ V}$ ;  $U_0 = +U$ ). Circuitualmente:

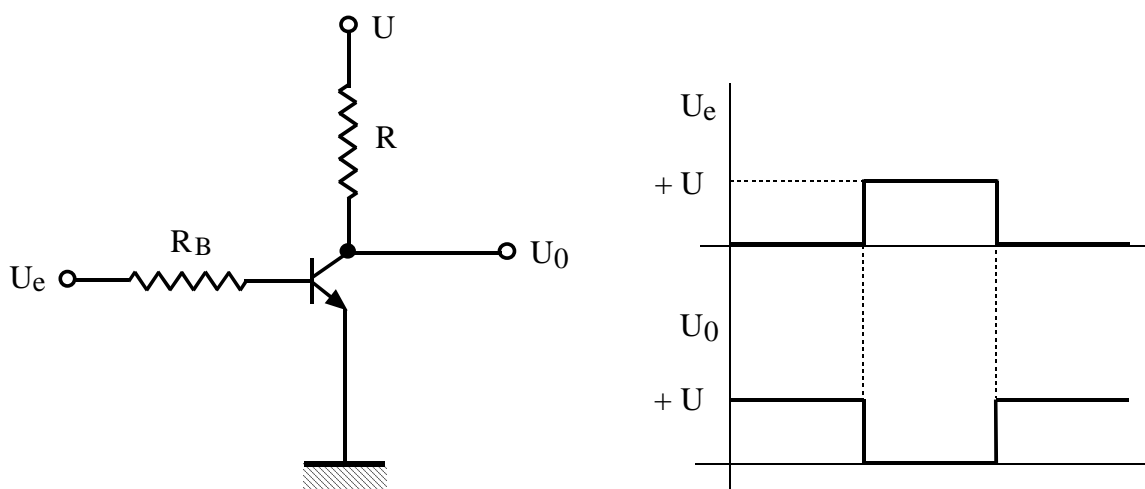


Figura 10.16. Circuito inversor

Cuando el transistor se polariza con una sola resistencia de base tal como se muestra en la figura anterior, tiene el inconveniente de que es muy sensible al ruido electromagnético que se puede inducir en la entrada  $U_e$ . Es decir, cuando el ruido electromagnético alcance tensiones próximas a 0,7 V (tensión umbral de la unión base-emisor) el transistor entra en la zona activa y la tensión de salida deja de ser nula.

Para que el circuito sea más inmune a la entrada de ruido electromagnético vamos a hacerlo utilizando dos resistencias en la base a modo de divisor de tensión. En este caso para que a la base del transistor le

lleguen 0,7 V, el nivel de ruido en la entrada  $U_e$  deberá ser mayor que los 0,7 V.

Observando la figura que exponemos a continuación y según el divisor de tensión:

$$0.7 = U_E \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow U_E = 0.7 \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

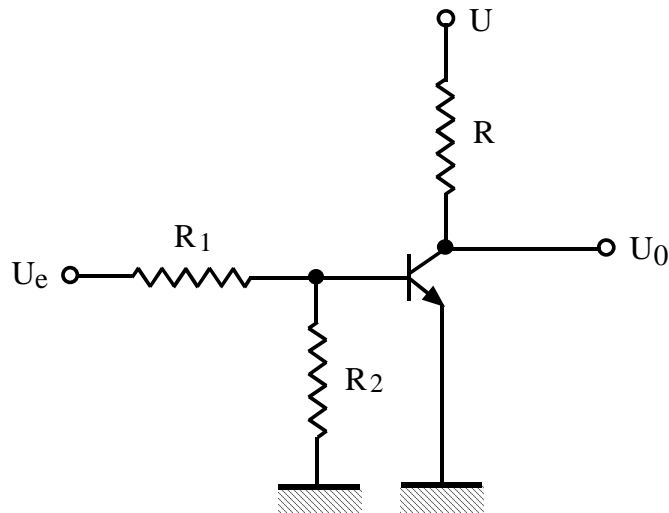


Figura 10.17. Circuito inversor con dos resistencias en la base a modo de divisor de tensión

Por ejemplo si  $R_1 = R_2$  el nivel de ruido a la entrada deberá alcanzar 1,4 V para que en la base haya 0,7 V. Por tanto ya tenemos definido nuestro segundo bloque el cual irá acoplado a la primera etapa de nuestro dispositivo electrónico, inmediatamente después del multivibrador astable formado por el LM555, ahora el  $T_{on}$  de la onda de salida de este bloque pasará a ser el  $T_{OFF}$  y viceversa debido a la acción del inversor. La salida  $V_0$  del LM555 ira cortocircuitada con la entrada  $V_e$  de nuestro circuito inversor quedando las gráficas de tensión de salida de cada bloque, llamando  $V_0$  a la salida del LM555 y  $V_0'$  a la del inversor; como se muestra en la figura 10.18.

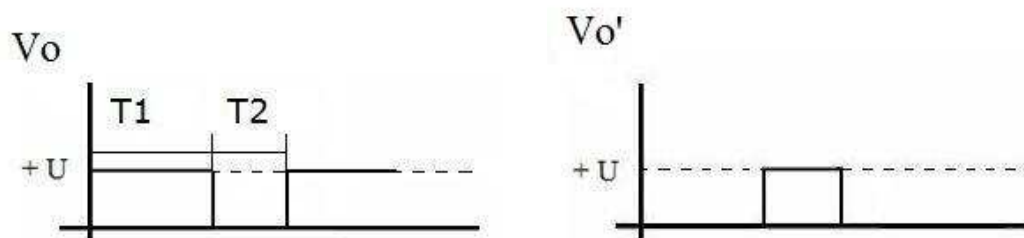


Figura 10.18. Gráficas de tensión de salida del LM555 y a la del inversor

Para la elección de las resistencias en este bloque; vamos a elegir los valores para las resistencias como  $R = R_1 = R_2 = 10K\Omega$ . Ahora que ya tenemos definidos los valores vamos a proceder al cálculo de las corrientes del circuito a partir de la tensión de entrada  $U_e$  por medio del teorema de Thevenin.

Por tanto vamos a hacer el equivalente Thevenin entre los terminales A y B del generador  $U_e$  con las resistencias  $R_1$  y  $R_2$ . Queda expresado de la siguiente manera:

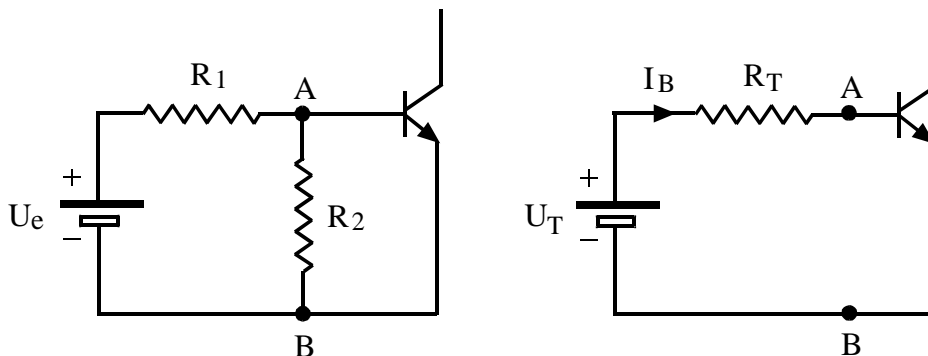


Figura 10.19. Circuito Thevenin equivalente para calcular la corriente de base

$U_e$  puede valer  $+V_{cc}$  o cero, ya esté en estado alto (1) o nivel bajo (0) (despreciando caídas de tensión). Para el valor de  $V_{cc}$  elegimos 9V, el cuál alimentará tanto a la patilla número ocho del LM555 como al inversor (tensión U en el dibujo representado anteriormente) conectado a la salida de este. El diseño de dicha fuente de alimentación lo especificaremos más adelante. Por tanto, calculamos:

- **Cuando  $U_e$  valga 9V**, el transistor entrará en **saturación**, lo comprobamos:

$$U_T = U_e \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 9 \cdot \frac{10 \times 10^3}{20 \times 10^3} = 4.5V ;$$

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 5K\Omega ;$$

$$\text{Por tanto: } I_B = \frac{U_T - U_{BE}}{R_T} = \frac{4.5 - 0.7}{5 \times 10^3} = 0.76mA$$

$$V_{CE_{SAT}} = -0.5 + 0.7 = 0.2 \Rightarrow I_C = \frac{9 - 0.2}{10 \times 10^3} = 0.88mA$$



Para comprobar hipótesis de saturación, eligiendo una  $\beta_F = 110$  (ya que para la elección del transistor elegiremos el BC547 como veremos más adelante, en el cual su  $\beta$  o ganancia de corriente en continua puede estar comprendida entre 110 y 220). Utilizamos la ganancia mínima ya que ésta ganancia cambia con la  $I_C$ , con la temperatura y con la sustitución del transistor. De este modo garantizamos que el transistor no salga del estado de saturación aunque la  $I_C$  varíe o la temperatura de trabajo disminuya:

$$I_C \leq \beta_F I_B \Rightarrow I_B \geq \frac{I_C}{\beta_F} = \frac{0.88mA}{110} = 8\mu A$$

Como  $I_B = 0.76mA \geq 8\mu A$  el transistor está en saturación y la salida  $V_0$  del inversor valdrá  $V_0 = V_{CE_{SAT}} = 0.2 \approx 0V$ ; estando la salida en estado bajo.

- **Cuando  $U_e$  valga  $0V$** , el transistor entrará en **corte**, lo comprobamos:

Con el transistor en corte los terminales del transistor resultan:  
 $I_B = I_C = I_E = 0$ .

Para comprobar que efectivamente el transistor se encuentra en corte debemos comprobar que  $V_B \leq V_E$  y  $V_B \leq V_C$ :

$$V_B = 0V ; V_E = 0V ; V_B \leq V_C = 9V \Rightarrow \text{Transistor en corte}$$

La salida  $V_0$  del inversor valdrá  $V_0 = V_{CC} = 9V$  ya que al ser:

$$I_C = 0 = \frac{9 - V_0}{10 \times 10^3} \Rightarrow V_0 = 9V ;$$

estando la salida en estado alto.

A la hora de implantar nuestro transistor a nuestro circuito y a la vista de los cálculos y características circuitales, optamos por el modelo BC547. Se trata de un transistor tipo NPN de baja potencia ya que puede disipar una potencia de 500mW máximo, admite una corriente de colector de hasta 100mA y su ganancia puede estar comprendida entre 110 y 220 (BC547, Tipo A).

Por tanto como modelo, dentro del amplio abanico de posibilidades que tenemos en disposición dentro del mercado; elegimos: *Transistor Si Plástico NPN, BC547CZL1G* del fabricante: *ON Semiconductor*. Sus parámetros principales los podemos extraer de su hoja de características suministrada por el fabricante (ver figura 10.20.).

#### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector - Emitter Voltage BC546 BC547 BC548	$V_{CEO}$	65 45 30	Vdc
Collector - Base Voltage BC546 BC547 BC548	$V_{CBO}$	80 50 30	Vdc
Emitter - Base Voltage	$V_{EBO}$	6.0	Vdc
Collector Current - Continuous	$I_C$	100	mAdc
Total Device Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	625 5.0	mW mW/ $^\circ\text{C}$
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	$P_D$	1.5 12	W mW/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

#### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction-to-Ambient	$R_{\theta JA}$	200	$^\circ\text{C/W}$
Thermal Resistance, Junction-to-Case	$R_{\theta JC}$	83.3	$^\circ\text{C/W}$

Stresses exceeding Maximum Ratings may damage the device. Maximum Ratings are stress ratings only. Functional operation above the Recommended Operating Conditions is not implied. Extended exposure to stresses above the Recommended Operating Conditions may affect device reliability.

Figura 10.20. Características principales del transistor BC547

*Nota: En esta tabla establecemos características como la corriente de colector, tensión colector-emisor, tensión emisor-base o tensión colector-base; que junto con las especificaciones de arriba, representa lo más relevante. Para poder consultar otros parámetros o características con más detalle se deben consultar las demás hojas suministradas por el fabricante. Se establece esta tabla a modo de análisis simplificado.*

Con el diseño que hasta este punto tenemos de nuestro circuito; ya tenemos generada una onda de tensión con forma de onda cuadrada (forma de onda a la salida del inversor,  $V_0'$ ).

#### 10.2.3. Tercer bloque: Conexión Darlington. Diodo en antiparalelo con la bobina.

La entrada de este tercer bloque de nuestro circuito de control estará cortocircuitada con la salida  $V_0'$  del bloque anterior, el circuito inversor. Su representación circuital la podemos establecer como se refleja en la figura 10.21.

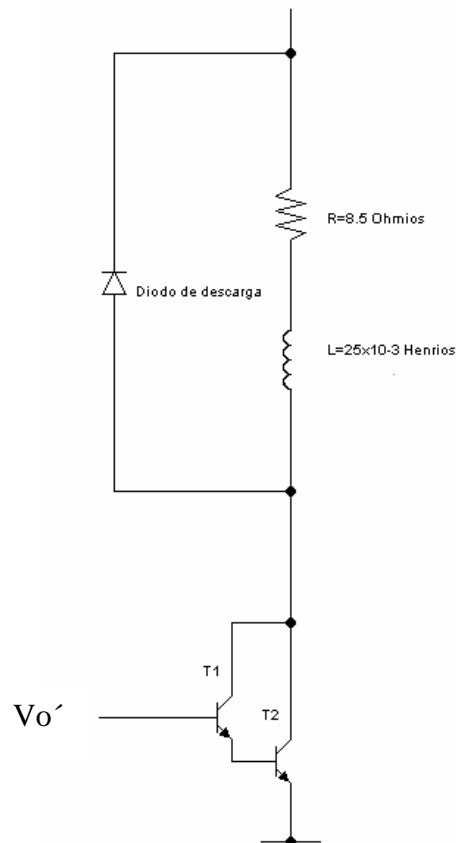


Figura 10.21. Representación circuital del tercer bloque

Como ya hemos comentado en el final del apartado del bloque dos del dispositivo electrónico, ya tenemos generada la tensión con forma de onda cuadrada. Pero en el diseño que nos concierne, la bobina tendrá que ser alimentada durante intervalos o anchuras de tiempo (modificando  $T_{OFF}$  y por tanto el período) a una tensión de pico de  $24\sqrt{2}V$  y con una corriente de pico recorriendo la bobina de 4A.

Este control del período ya lo conseguimos con la tensión de salida  $V_o'$  del inversor, que suministra la corriente de control. Pero la corriente de control a la salida del inversor es muy baja, del orden de mA; revisando los cálculos del inversor nos resultaba una intensidad de colector de 0.88mA, que teniendo en cuenta la caída de tensión base-emisor del Darlington (como ahora especificaremos) resultan 0.76mA (ya que al conectar la salida del inversor al Darlington, éste inyecta una caída de tensión).

Por tanto necesitamos un control de corriente del orden de amperios (intensidad de pico recorriendo la bobina de 4A) a partir de esta corriente suministrada por el inversor que es del orden de mA; es por ello que integramos en el diseño la conexión de dos transistores en modo Darlington (parte inferior de la figura 10.21.).

Su objetivo por tanto es controlar corrientes elevadas (amperios) mediante corrientes de control muy bajas (mA), haciéndolo trabajar (ya que lo podemos considerar como un sólo transistor con una  $\beta_F \approx \beta_1\beta_2$ ) en función de su montaje como en el caso del inversor: en conmutación (corte y saturación).

Vamos a considerar al par Darlington como un único transistor. En dicha conexión la ganancia de dicho conjunto es aproximadamente igual al producto de las ganancias individuales de ambos transistores. Eligiendo una ganancia para el T1 de  $\beta_F = 63$  (ya que para la elección del T1 elegiremos el BD139 como veremos más adelante, en el cual su  $\beta$  o ganancia de corriente en continua puede estar comprendida entre 63 y 110), y para el T2 una ganancia de  $\beta_F = 20$  (ya que para la elección del T2 elegiremos el 2N3055, en el cual su  $\beta$  puede estar comprendida entre 20 y 70); esto es:

$$\beta = \beta_1\beta_2 + \beta_1 + \beta_2 \approx \beta_1\beta_2 \approx 1260$$

La tensión base-emisor corresponde a la caída de tensión umbral directa de ambos transistores, por lo tanto es igual a la suma de las caídas de tensión base-emisor de ambos transistores:

$$U_{BE} = U_{BE1} + U_{BE2} = 0.7 + 0.7 = 1.4V$$

Y de la misma forma en modo saturación la tensión colector-emisor:

$$U_{CE} = U_{CE1} + U_{BE2} = 0.2 + 0.7 = 0.9V$$

Por tanto y sabiendo que la conexión Darlington trabaja en conmutación:

**- En corte:** Como en el caso del inversor que ya hemos visto, cuando el interruptor esté abierto, la corriente de base resultará ser cero y el transistor estará en corte. En esta situación la corriente de colector será cero y por la bobina no circulará nada de corriente.

**- En saturación:** Circulará corriente por la bobina, y pasado un intervalo de tiempo (dependiendo de la frecuencia de operación del circuito) la bobina alcanzará su máxima corriente de pico de 4 Amperios. Por tanto la máxima corriente de colector que circulará por el par Darlington serán esos 4 Amperios:

$$I_{m\acute{a}x} = I_0 = I_C = \frac{24\sqrt{2}V - 0.9}{8.5\Omega} = 3.8871 \approx 4A ; I_B = \frac{9 - 1.4}{10 \times 10^3} = 0.76mA$$

Para comprobar hipótesis de saturación:

$$I_C \leq \beta_F I_B \Rightarrow I_B \geq \frac{I_C}{\beta_F} = \frac{4A}{1260} = 3.1746mA$$





Observamos que  $I_B$  no es mayor que los 3.1746mA que nos especifica la desigualdad.

Por ello estamos obligados a modificar la  $I_B$  de nuestro par Darlington, que es la corriente de colector del transistor del bloque inversor cuando trabaja en modo saturación (ya que en corte es cero y no influye, ya que el Darlington se encuentra en corte igualmente).

Por tanto debemos modificar la resistencia  $R$  conectada al colector del transistor del circuito inversor, estableciendo que como mínimo por esa patilla circulen 3.1746mA (aproximadamente 3.2mA). Resultando:

$$I_B = \frac{9-1.4}{R} = 3.2mA \Rightarrow R = 2.375K\Omega$$

Por tanto para garantizar que un valor de intensidad mayor que 3.2mA; elegimos la resistencia normalizada inmediatamente inferior a la que nos ha resultado en los cálculos: optamos por una  $R=1K\Omega$ . Ahora si que se cumple el estado de saturación para el correcto funcionamiento de nuestro circuito:

$$I_B \geq \frac{I_C}{\beta_F} = 3.1746mA \Rightarrow \frac{9-1.4}{1K\Omega} = 7.6mA \geq 3.2mA \Rightarrow SATURACIÓN$$

Cabe destacar que la modificación de la resistencia de la patilla de colector del inversor no modifica el correcto funcionamiento del mismo, ya que en modo saturación; quedaría:

$$I_{B_{INVERSOR}} = \frac{U_T - U_{BE_{INV}}}{R_T} = \frac{4.5-0.7}{5 \times 10^3} = 0.76mA$$

$$I_{C_{INVERSOR}} = \frac{9-1.4}{1 \times 10^3} = 7.6mA$$

$$I_{C_{INVERSOR}} \leq \beta_F I_{B_{INVERSOR}} \Rightarrow I_{B_{INVERSOR}} \geq \frac{I_{C_{INVERSOR}}}{\beta_F} = \frac{7.6mA}{110} = 0.069mA \Rightarrow SATURACIÓN$$

En cuanto a las resistencias del inversor, tanto la de 10K $\Omega$  como la de 1K $\Omega$ ; bastaría con que se caracterizasen por tener una tolerancia del 5% y una potencia nominal de 0.25W (ya que las corrientes que circulan por ellas no hacen disipar más potencia que ésta).

A la hora de implantar nuestros transistores del par Darlington a nuestro circuito y a la vista de los cálculos y características circuitales, optamos por el modelo BD139 para el T1 y el 2N3055 para el T2.

En cuanto al BD139 se trata de un transistor tipo NPN de media potencia ya que puede disipar una potencia de 12.5W máximo, admite una corriente de colector de hasta 1.5A y su ganancia puede estar comprendida entre 63 y 160.

Por tanto como modelo elegimos: *Transistor Bipolar NPN 80V 1.5A SOT32 (BD139-10)* del fabricante: *STMicroelectronics*. Sus parámetros principales los podemos extraer de su hoja de características suministrada por el fabricante:

**Table 2. Absolute maximum ratings**

Symbol	Parameter	Value				Unit
		NPN		PNP		
		BD135	BD139	BD136	BD140	
V <sub>CBO</sub>	Collector-base voltage (I <sub>E</sub> = 0)	45	80	-45	-80	V
V <sub>CEO</sub>	Collector-emitter voltage (I <sub>B</sub> = 0)	45	80	-45	-80	V
V <sub>EBO</sub>	Emitter-base voltage (I <sub>C</sub> = 0)	5		-5		V
I <sub>C</sub>	Collector current	1.5		-1.5		A
I <sub>CM</sub>	Collector peak current	3		-3		A
I <sub>B</sub>	Base current	0.5		-0.5		A
P <sub>TOT</sub>	Total dissipation at T <sub>c</sub> ≤ 25 °C	12.5				W
P <sub>TOT</sub>	Total dissipation at T <sub>amb</sub> ≤ 25 °C	1.25				W
T <sub>stg</sub>	Storage temperature	-65 to 150				°C
T <sub>J</sub>	Max. operating junction temperature	150				°C

**Table 3. Thermal data**

Symbol	Parameter	Max value	Unit
$R_{thj-case}$	Thermal resistance junction-case	10	$^\circ\text{C/W}$
$R_{thj-amb}$	Thermal resistance junction-ambient	100	$^\circ\text{C/W}$

Figura 10.22. Características principales del transistor BD139

*NOTA: Para más información sobre parámetros o características, consultar la hoja de características suministrada por el fabricante.*

En lo que se refiere al 2N3055 se trata de un transistor tipo NPN de potencia ya que puede disipar una potencia de 115W máximo, admite una corriente de colector de hasta 15A y su ganancia puede estar comprendida entre 20 y 70.

Por tanto como modelo elegimos: *Transistor NPN de potencia, 2N3055* del fabricante: *STMicroelectronics*. Sus parámetros principales los

podemos extraer de su hoja de características suministrada por el fabricante, como está establecido en la figura 10.23.

#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter		Value	Unit
		NPN	2N3055	
		PNP	MJ2955	
$V_{CBO}$	Collector-Base Voltage ( $I_E = 0$ )		100	V
$V_{CER}$	Collector-Emitter Voltage ( $R_{BE} \leq 100\Omega$ )		70	V
$V_{CEO}$	Collector-Emitter Voltage ( $I_B = 0$ )		60	V
$V_{EBO}$	Emitter-Base Voltage ( $I_C = 0$ )		7	V
$I_C$	Collector Current		15	A
$I_B$	Base Current		7	A
$P_{tot}$	Total Dissipation at $T_c \leq 25^\circ\text{C}$		115	W
$T_{stg}$	Storage Temperature		-65 to 200	$^\circ\text{C}$
$T_j$	Max. Operating Junction Temperature		200	$^\circ\text{C}$

For PNP types voltage and current values are negative.

#### THERMAL DATA

$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case	Max	1.5	$^\circ\text{C/W}$
----------------	----------------------------------	-----	-----	--------------------

Figura 10.23. Características principales del transistor 2N3055

*NOTA: Para más información sobre parámetros o características, consultar la hoja de características suministrada por el fabricante.*

Para proteger al transistor de los picos de sobretensión que se producen en la bobina en el momento de corte de la corriente (paso a estado bajo o  $T_{OFF}$ ); montamos un diodo en antiparalelo con la bobina (diodo de descarga).

Es decir, protegemos del pico de corriente cuanto el par Darlington pasa de saturación a corte. Este diodo debe soportar como mínimo los 4 Amperios de corriente de pico que debe soportar la bobina, para poder proteger al transistor.

Por establecer uno en concreto establecemos el modelo: *P600D-E3*; del fabricante *Vishay*. Como características principales podemos extraer las siguientes: corriente directa continua máxima de 6A, transitorios de corriente no repetitiva de pico de 400A, soportando con grandes márgenes la tensión de alimentación que inyectamos a la bobina tanto en polarización directa como en inversa.

Todas estas características vienen representadas en la figura 10.24., establecida en la siguiente hoja (ver la opción de la tabla marcada con un círculo).

MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ unless otherwise noted)									
PARAMETER	SYMBOL	P600A	P600B	P600D	P600G	P600J	P600K	P600M	UNIT
Maximum repetitive peak reverse voltage	$V_{RRM}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS voltage	$V_{RMS}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC blocking voltage	$V_{DC}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum average forward rectified current at $T_A = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 0.375" (9.5 mm) lead length (Fig. 1) $T_L = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 0.125" (3.18 mm) lead length (Fig. 2)	$I_{F(AV)}$	6.0 22							A
Peak forward surge current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	$I_{FSM}$	400							A
Operating junction and storage temperature range	$T_J, T_{STG}$	- 50 to + 150							$^{\circ}\text{C}$

Figura 10.24. Características principales del diodo de descarga

#### 10.2.4. Fuente de alimentación.

A la hora de conformar nuestro dispositivo electrónico hemos tenido que utilizar una fuente de alimentación de tensión continua de 9 Voltios para alimentar tanto al temporizador LM555, como para el diseño del segundo bloque; el circuito inversor. La fuente de alimentación consta de cuatro partes fundamentales o bloques:

- **TRANSFORMADOR:** Reduce la tensión de red a una tensión inferior cuyo valor de pico sea compatible con la tensión de entrada del estabilizador.
- **PUENTE RECTIFICADOR:** Transforma la corriente alterna a corriente continua pulsante. El puente rectificador lo implementamos con un integrado de cuatro diodos para obtener una rectificación en onda completa, como ya habíamos utilizado en la parte de rectificación dentro de la etapa de potencia.
- **FILTRO:** Alisa con un cierto nivel de rizado la onda pulsante de salida. Está formado por uno o varios condensadores de capacidad adecuada conectados en paralelo con la salida del rectificador.
- **ESTABILIZADOR o REGULADOR:** Tiene por misión mantener constante la tensión a su salida aunque la tensión de entrada cambie o la corriente de carga varíe. Los reguladores fijos más comunes son los de la familia 78XX; concretamente he optado por el 7809 ya que las dos últimas cifras hacen referencia al valor de la tensión de salida que en nuestro caso son los 9 Voltios que necesitamos. El regulador dispone de tres terminales además de no necesitar resistencias adicionales para su funcionamiento:

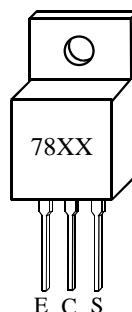


Figura 10.25. Encapsulado del regulador 78XX

- *Entrada (E)*: se conecta a la tensión de entrada no regulada.
- *Salida (S)*: proporciona una tensión estabilizada.
- *Común (C)*: es el terminal de referencia o masa.

Para garantizar que el estabilizador funcione adecuadamente, el nivel mínimo de la tensión de rizado (o tensión mínima de entrada al regulador) deberá estar 3 V por encima de la tensión nominal de salida regulada y el nivel máximo de la tensión de rizado a la entrada no deberá superar los 35 V para que pueda soportar la potencia máxima. Es decir, el estabilizador de tensión (7809) garantiza una tensión estabilizada a 9 V a su salida (S), siempre que a su entrada (E) llegue como mínimo 12 V y no sobrepase los 35 V. Por tanto esto ya lo garantizamos al acoplar el transformador monofásico de 230/12V (5 VA) e inyectar esos 12V eficaces a la entrada del regulador, siendo su valor de pico de  $12\sqrt{2} \approx 16.97 \text{ V}$ , por tanto  $U_E = 16.97 \text{ V}$ .

El regulador puede proporcionar hasta 1 A de corriente siempre que esté adecuadamente refrigerado con un disipador de calor. En general los reguladores de tensión se calientan debido al paso de la corriente que circula desde el terminal de entrada hasta el terminal de salida (la corriente por el terminal común se puede despreciar).

La potencia disipada en forma de calor por el regulador es proporcional a la corriente que circula por él y la diferencia de potencial entre el terminal de entrada y el terminal de salida, es decir:  $P_{REG} = I_C (U_E - U_S)$ . Por tanto, el esquema de nuestra fuente de alimentación queda de la siguiente forma:

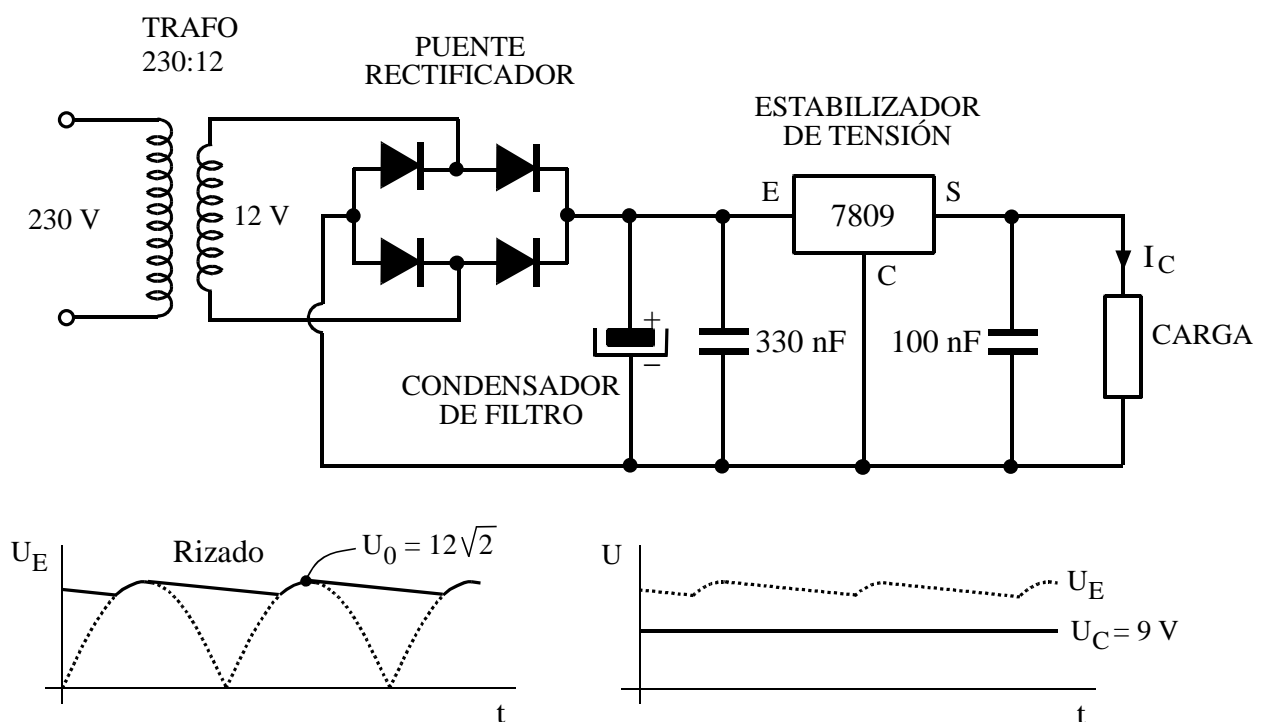


Figura 10.26. Fuente de alimentación con regulador fijo

Los condensadores de 330 nF y 100 nF conectados respectivamente a la entrada y a la salida del regulador, son para filtrar el ruido electromagnético que pudiera entrar en el circuito. Existe un amplio abanico de posibilidades en cuanto a la elección de condensadores con estas características, dentro de los catálogos suministrados por los fabricantes.

Cabe destacar, que estos condensadores deben ser condensadores de poliéster para tengan un tiempo de respuesta rápido ante señales de frecuencia elevada. El condensador de filtro como tiene que ser de una capacidad elevada es de tipo electrolítico y por lo tanto es de respuesta lenta para señales de alta frecuencia.

Para tener una referencia comercial del transformador monofásico 230/12V (5VA), el transformador elegido es el modelo: *PCB mount transformer 5.0VA 1x12 o/p*; del fabricante *Block*. Sus características son las que siguen:

Input data	
Input voltage	230 V
Frequency range	50 - 60 Hz
No-load loss (typ.)	1.4 W
Output data	
Output voltage	12 V
No-load voltage (ca. x factor)	1.25
Efficiency	68 %
Power	5.0 VA
Standards and security	
Approvals	C-UL-US, ENEC 10 (VDE)
Short circuit strength	non-short-circuit proof
Protection index	IP 00
Safety class (prepared)	II
Ambient temperature max.	50 °C
Class of Insulation System	VDE=B, UL=105
Test voltage	5000 V, 50 Hz
Mechanical data	
Type	encapsulated
Core type	EI 42/14,8
Terminals	Pins for printed circuit boards
Pin (ø)	0.8 mm
Weight	0.19 kg
Order numbers	
Order Number	VC 5,0/1/12

Figura 10.27. Características transformador 230/12V de 5VA

La intensidad máxima que será capaz de suministrar la fuente de alimentación resulta de:  $I_{OUT} = 5VA/12\sqrt{2} = 294mA$ ; la cual es más que suficiente para alimentar la demanda del circuito. La carga será la correspondiente a nuestro dispositivo electrónico, ya que la fuente de 9 Voltios la conectaremos como ya hemos comentado, tanto al temporizador LM555 como al bloque inversor.

La corriente de colector del inversor resultaba de 7.6mA y las corrientes por las patillas del LM555 en las cuales conectamos la fuente son del orden de mA y en ningún caso sobrepasarán, en conjunto, los 294 mA que nos suministra la fuente (como mostrábamos en el esquema

simplificado del temporizador, figura 10.10.). Por tanto nuestro regulador no corre peligro de destrucción y la demanda de corriente está asegurada.

En cuanto al condensador de filtro, vamos a calcular su valor mínimo de capacidad posible; de tal forma que la tensión mínima del rizado no caiga por debajo de los 12 Voltios a la entrada del regulador. Suponemos que el valor que consume la carga es de 294 mA aunque nunca llegará a este valor porque el consumo real es muy bajo, y suponemos también que el condensador comienza la descarga a partir de la tensión de pico ( $U_0$ ) y que se prolonga durante 10 ms (un semiciclo); es decir:

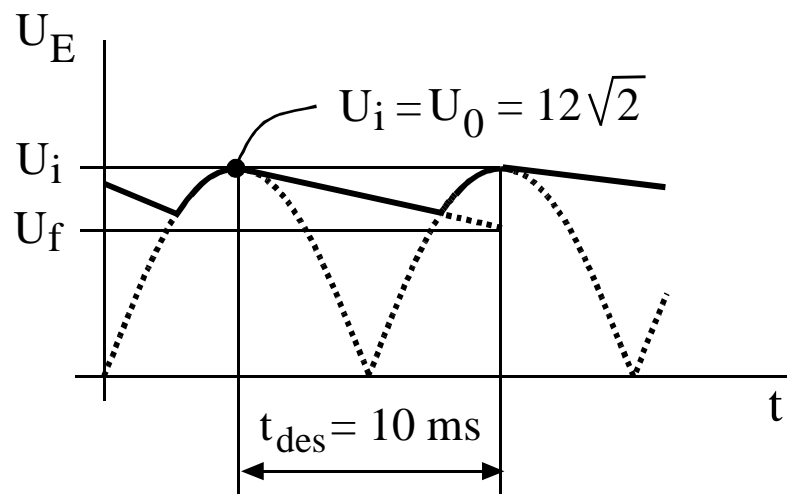


Figura 10.28. Rizado en el condensador de filtro

- Carga inicial:  $Q_i = C \cdot U_0$  ;
- Carga cedida en la descarga:  $Q_{DES} = I_C \cdot t_{DES}$  ( $I_C = 294mA$ ;  $t_{DES} = 0.01seg$  )

La descarga se produce en un tiempo ligeramente inferior a medio ciclo de la tensión de red, sin embargo al no conocer su tiempo exacto se puede considerar medio ciclo para el cálculo (10 ms). Este error cometido será pequeño y además será favorable porque el rizado real será inferior al calculado. Como el regulador mantiene constante la tensión del circuito de carga, la corriente de descarga  $I_C$  es fija de 294 mA.

- Carga final en la descarga:  $Q_f = Q_i - Q_{DES} = C \cdot U_0 - I_C \cdot t_{DES}$

$$\text{Como } C = \frac{Q_f}{U_f} = \frac{C \cdot U_0 - I \cdot t_{DES}}{U_f} \Rightarrow C = \frac{I \cdot t_{DES}}{U_0 - U_i} = \frac{0.294 \times 10 \cdot 10^{-3}}{16.97 - 12} \approx 588 \mu F$$



Para escoger un valor normalizado optamos por un valor para el condensador de filtro de  $560\mu F$ , ya que hay que tener en cuenta la carga nunca llegará a consumir esos 294mA sino que será un valor menor. Para elegir un condensador electrolítico en concreto dentro del mercado escogemos el modelo: *EEUFC1E561, CONDENSADOR, 560UF 25V* del fabricante *Panasonic*. Sus especificaciones las podemos consultar en la hoja de características suministrada por el fabricante del modelo (familia o series FC, tipo A). Fijémonos en la figura 10.29.:

■ Specifications									
Operating Temp. Range	-55 to +105 °C								
Rated W.V. Range	6.3 to 63 V.DC								
Nominal Cap. Range	1.0 to 15000 μF								
Capacitance Tolerance	±20 % (120 Hz/+20 °C)								
DC Leakage Current	I ≤ 0.01 CV or 3 (μA) after 2 minutes application of rated working voltage at +20 °C (Whichever is the greater)								
Dissipation Factor	W.V. (V)	6.3	10	16	25	35	50	63	(120 Hz/+20 °C) (max.)
	D.F.	0.22	0.19	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	
	Add 0.02 per 1000 μF for products of 1000 μF or more.								
Endurance	After following life test with DC voltage and +105±2 °C ripple current value applied (The sum of DC and ripple peak voltage shall not exceed the rated working voltage), the capacitors shall meet the limits specified below. Duration: 1000 hours (φ4 to 6.3), 2000 hours (φ8), 3000 hours (φ10), 5000 hours (φ12.5 to 18) Post test requirements at +20 °C								
	Capacitance change		±20 % of initial measured value						
	D.F.		≤ 200 % of initial specified value						
	DC leakage current		≤ Initial specified value						
Shelf Life	After storage for 1000 hours at +105±2 °C with no voltage applied and then being stabilized at +20 °C, capacitor shall meet the limits specified in "Endurance".								

Figura 10.29. Características principales del condensador de filtro de 560uF

Por último y para fijar las características de los diodos conectados en el puente de rectificación; en lo que se refiere al diseño de una fuente de alimentación basta con elegir diodos de 1 Amperio. Por establecer uno en concreto podemos elegir el modelo: *1N4005-E3*, del fabricante *Vishay*. Sus características generales se reflejan en el siguiente cuadro:

MAXIMUM RATINGS ( $T_A = 25\text{ °C}$ unless otherwise noted)									
PARAMETER	SYMBOL	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	UNIT
Maximum repetitive peak reverse voltage	$V_{RRM}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum RMS voltage	$V_{RMS}$	35	70	140	280	420	560	700	V
Maximum DC blocking voltage	$V_{DC}$	50	100	200	400	600	800	1000	V
Maximum average forward rectified current 0.375" (9.5 mm) lead length at $T_A = 75\text{ °C}$	$I_{F(AV)}$	1.0							A
Peak forward surge current 8.3 ms single half sine-wave superimposed on rated load	$I_{FSM}$	30							A
Non-repetitive Peak forward surge current square waveform $t_p = 1\text{ ms}$ $t_p = 2\text{ ms}$ $T_A = 25\text{ °C}$ (Fig. 3) $t_p = 5\text{ ms}$	$I_{FSM}$	45 35 30							A
Maximum full load reverse current, full cycle average 0.375" (9.5 mm) lead length $T_L = 75\text{ °C}$	$I_{R(AV)}$	30							$\mu A$
Rating for fusing ( $t < 8.3\text{ ms}$ ) <sup>(1)</sup>	$I^2t$	3.7							A <sup>2</sup> sec
Operating junction and storage temperature range	$T_J, T_{STG}$	- 50 to + 150							°C

Figura 10.30. Características de los diodos conectados en el puente de rectificación



### 10.3. Fijación del valor mínimo de campo magnético.

A lo largo del proyecto, el objetivo de nuestro equipo de magnetoterapia con control de pulsos (formado por la bobina en serie con la resistencia y el dispositivo electrónico o controlador) ha sido poder modificar el tiempo de exposición de un campo magnético generado en el interior de la bobina; con un valor de intensidad de 75 Gauss. Esto era posible debido a que asegurábamos la carga de la bobina a un valor de corriente de pico de 4 Amperios; al establecer el período mínimo total en  $8\tau$  ( $4\tau$  para asegurar la carga y otros  $4\tau$  para asegurar la descarga) o lo que es lo mismo una frecuencia máxima de operación teórica de 42,51 Hz (en la práctica, recordemos que alcanzaba el valor de 40 Hz).

Cabe la posibilidad de poder generar campos magnéticos de menor intensidad, como por ejemplo 10 Gauss (el menor campo posible de aplicación, ya que en ningún tratamiento de magnetoterapia se ha observado el empleo de intensidades de campo menores; apartado 5); lo cual podemos conseguir modificando la modelización de la bobina al variar el valor de la resistencia en serie que presenta.

Para ello necesitaríamos 0.5518 Amperios de pico para poder fijarlo (según la fórmula del campo magnético, ver apartado 8.2). Por tanto y en base a los cálculos, fijamos un valor para  $I_0$  de 0.5518 Amperios.

La resistencia total en serie con la inductancia (siendo  $R_t$  la suma de la resistencia  $R$  que caracteriza la bobina más la que conectamos en serie con ella) varía con respecto a la que presenta para la generación de campo magnético con valor de 75 Gauss; quedando definida de la forma:

$$R_t = \frac{V_0}{I_0} = \frac{24\sqrt{2}}{0.5518} = 61.5098\Omega \approx 61.5\Omega$$

Adquiriendo la constante de tiempo  $\tau$  el siguiente valor, la cuál queda reducida a:

$$\tau = \frac{L}{R_t} = \frac{24.986 \times 10^{-3} H}{61.5\Omega} = 0.406 ms$$

El período mínimo para alcanzar la corriente máxima de 0.5518 Amperios y su posterior descarga, es igual a  $8\tau$ ; quedando el período definido como:  $T_{min} = 8\tau = 3.248 ms \Rightarrow f_{max} = 307.88 Hz$ .

El nuevo valor de la corriente eficaz circulante en nuestro circuito adquiere el valor:

$$I_{ef} = \frac{I_0}{\sqrt{T}} \sqrt{3\tau} = \frac{0.5518}{\sqrt{3.248 \times 10^{-3}}} \sqrt{3 \times 0.406 \times 10^{-3}} = 0.3379 A$$

Recordemos que fijábamos el valor de corriente eficaz óptimo para el funcionamiento de nuestra bobina en 2.24 Amperios. Observamos que  $0.3379A \ll 2.24A$ ; por tanto nuestra bobina adquiere un valor de temperatura aceptable.

Por tanto nuestro diseño resulta no ser perjudicial para el correcto funcionamiento de la bobina, colocando una resistencia en serie (con la resistencia ya existente de  $3.3\Omega$ ) con la bobina; de  $53\Omega$ .

Con este valor de 0.5518 Amperios de corriente de pico, obtendremos un valor de campo magnético en el interior de la bobina (en el centro) de aproximadamente 10 Gauss. El circuito resultante se muestra en la figura 9.7.

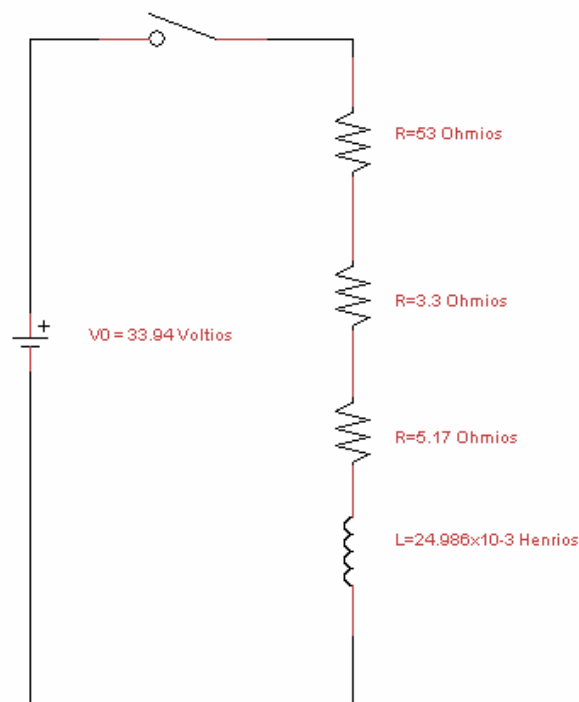


Figura 10.31. Caracterización y modelizado de la bobina para generar un campo de 10 Gauss

El calentamiento en la resistencia queda definido como la potencia que disipa, su potencia es:

$$P = R x I_{ef}^2 = 53 \times 0.5518^2 = 16.1376W \approx 17W$$

Para poder conectar ésta resistencia de 53 Ohmios en función de la potencia de 17W que se disipa en la misma y con valores de resistencia normalizados; optamos por conectar 4 resistencias cerámicas en serie de 1.5 Ohmios (de potencia nominal 4W) y conectadas igualmente en serie con otra cerámica de 47 Ohmios (de potencia nominal 17W). Bastará con que presenten una tolerancia del 5%.



La potencia que presenta cada resistencia resulta:

- Resistencia de 1.5 Ohmios, tolerancia 5%, potencia nominal 4W:

$$P = 1.5 \times 0.5518^2 = 0.4567W \approx 0.5W < 4W$$

- Resistencia de 47 Ohmios, tolerancia 5%, potencia nominal 17W:

$$P = 47 \times 0.5518^2 = 14.3107W \approx 14.5W < 17W$$

En vista a los valores de potencia especificados, las resistencias cerámicas elegidas no corren peligro de quemado o destrucción ya que poseen una potencia característica nominal mayor que la potencia que disipan cada una de ellas al conectarlas en serie con la bobina.



## **11. Simulación del dispositivo electrónico. Formas de onda.**

Llegados a éste punto ya tenemos definidas la etapa de potencia y cada uno de los bloques que conforman la etapa de control.

Como ya habíamos establecido anteriormente, ya comprendemos las partes en que se compone nuestro dispositivo electrónico y ahora la idea es simularlo en conjunto; observando la repuesta que produce que no tiene que ser otra que la generación de una tensión pulsante cuadrada que alimente a nuestra bobina pudiendo modificar su período y en consecuencia su frecuencia; dando lugar a un campo magnético pulsante en su interior (en el centro de la bobina) de valor, una vez estabilizada la corriente y asegurando la carga en la bobina; de 75 Gauss.

Para ello vamos a utilizar el programa de simulación de circuitos electrónicos TINA, con el cuál vamos a poder medir las diferentes respuestas en las distintas partes de nuestro circuito y así comprobar todos que su funcionamiento es el óptimo; todo ello en vista a los cálculos que hasta este punto del proyecto hemos realizado sobre el control de la frecuencia de operación de nuestra bobina.

A la hora de dibujar el circuito en el simulador, hay componentes que no corresponden con los que he descrito a la hora de añadirlos a nuestro circuito.

Los que he elegido son componentes correctos que a la hora de fabricar el dispositivo funcionarían en función de las características que presentan, pero en este simulador no se encuentran todos los modelos principalmente de diodos; y es por ello que en el dibujo que aquí presento puedan diferir con los que antes he establecido.

Sus características son muy semejantes y por tanto a la hora de establecer el circuito y su estudio; son igualmente válidas.

El circuito queda diseñado como se muestra en la figura 11.1.

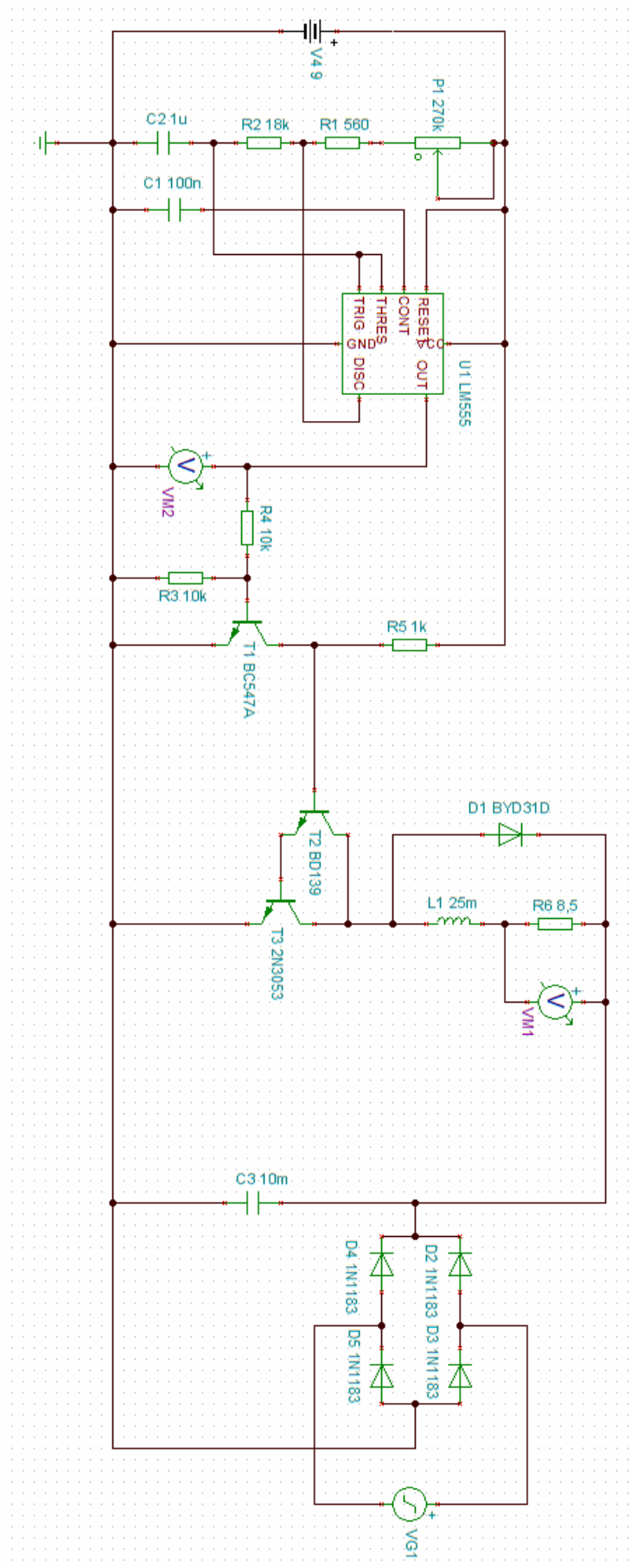


Figura 11.1. Simulación del dispositivo electrónico a través del software TINA

Podemos percatarnos que hemos conectado dos voltímetros dentro del circuito para poder observar y medir, con la opción de osciloscopio; las formas de onda resultantes en las diferentes partes del dispositivo que están conectados.

Con el voltímetro 1 observamos la forma de onda de la tensión en la resistencia de 8.5 ohmios en serie con la bobina mientras que con el voltímetro 2 observamos la forma de onda resultante de tensión a la salida del bloque inversor.

La forma de onda en la resistencia tiene la misma forma que la de la intensidad que recorre la bobina, de ahí que observemos un crecimiento y decrecimiento exponencial en la función. Esto es debido a que al estar en serie la bobina con la resistencia la intensidad que circula es la misma, siendo su tensión el producto de esa intensidad por el valor de la resistencia; ya que en la resistencia tanto la intensidad como la tensión están en fase. Por tanto, simulamos el programa:

- Para  $R_1 = 0K\Omega$ , debemos obtener el período total mínimo:

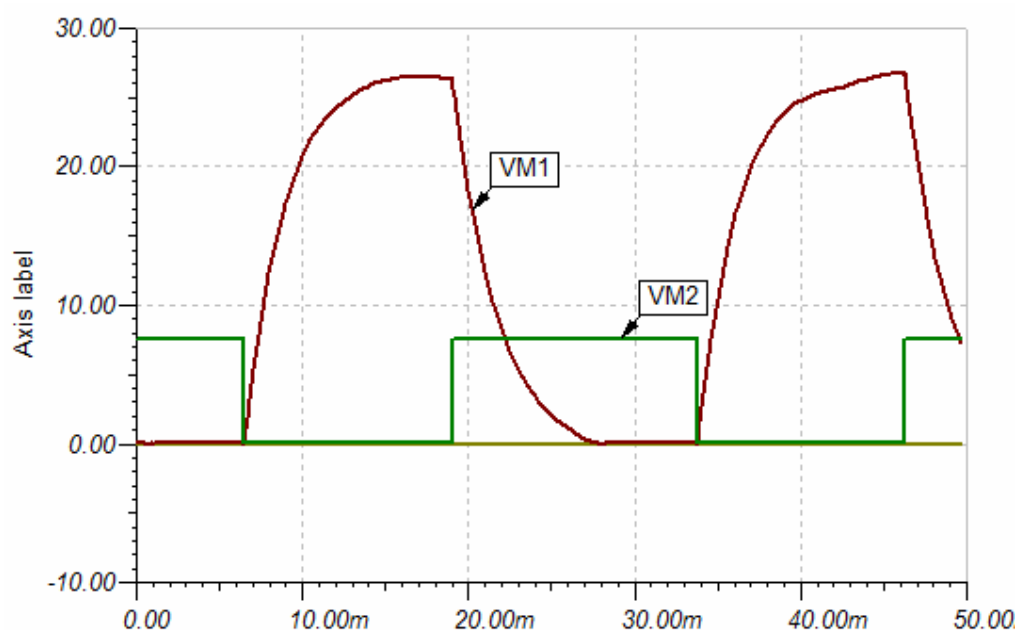


Figura 11.2. Formas de onda en el caso del período total mínimo

Midiendo el tiempo en estado alto o  $T_1$  nos resulta 14.74 ms, siendo el tiempo en estado bajo o  $T_2$  (valor fijo) de 12.47 ms y el período total de 27.21 ms. Los resultados, comparándolos con los teóricos, son aceptables.



Cabe destacar que la amplitud de la onda cuadrada resulta de 7.6 V, lo cual no corresponde con los 9 Voltios exactos (que son los que suministra la fuente de alimentación) debido a que existen caídas de tensión dentro del temporizador LM555.

Lo mismo ocurre con la onda de tensión medida en la resistencia, la cual se caracteriza por tener un valor de pico de 26.75 Voltios (recordemos que alimentamos la bobina en serie con la resistencia al valor de pico de 33.94 Voltios); existiendo caídas de tensión en el Darlington, diodos y bobina.

- Para  $R_1 = 270K\Omega$ , debemos obtener el período total máximo:

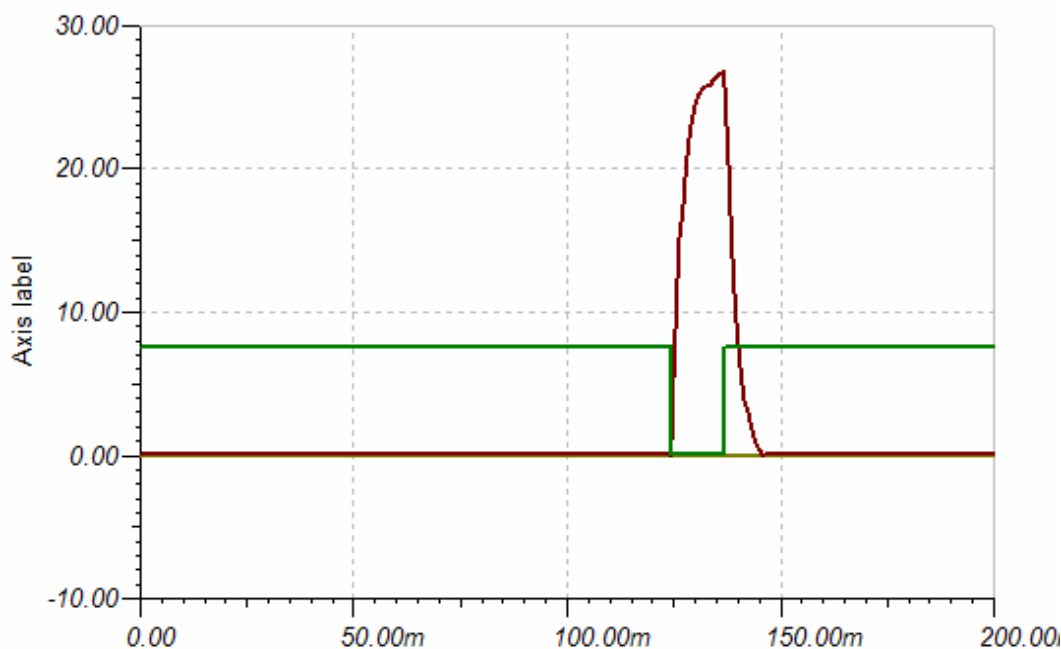


Figura 11.3. Formas de onda en el caso del período total máximo

No podemos medir  $T_1$  ya que al ser tener un valor tan elevado, ni modificando el eje de tiempos ya que la resolución resulta ilegible a la hora de poder medir con los cursores, se sale de pantalla.

Ante esta situación situamos el potenciómetro a la mitad de su valor máximo, es decir, 135K y así podemos comparar los tiempos resultantes con el caso del período total máximo. La gráfica resulta la representada en la figura 11.4.

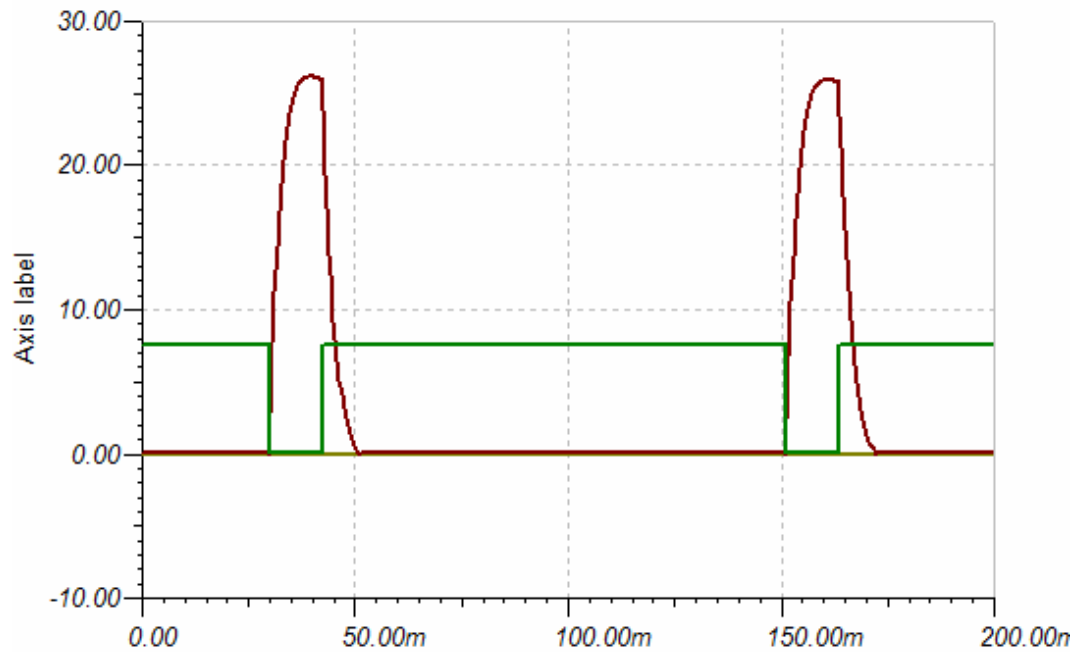


Figura 11.4. Formas de onda en el caso del período total medio

Midiendo el tiempo en estado alto o  $T_1$  nos resulta 108.76 ms, siendo el tiempo en estado bajo o  $T_2$  (valor fijo) de 12.44 ms y el período total de 121.2 ms.

Comparando los resultados,  $T_1=108.76$  ms resulta ser aproximadamente la mitad que  $T_{1máx}=199.6$  ms; lo que es lógico al poner el potenciómetro a mitad de carga (ya que  $T_2$  es un valor fijo). Por tanto concuerda con los cálculos teóricos realizados anteriormente.



## **12. Estudio de mercado basado en la Osteoporosis.**

El objetivo ha sido realizar un estudio de mercado para examinar el impacto que tendría sacar al mercado este equipo de magnetoterapia con control de pulsos.

Para elaborar un estudio de mercado se requiere en primer lugar recabar la información necesaria para el procesamiento, análisis de los datos disponibles, y finalmente sacar conclusiones pertinentes.

La información necesaria se puede obtener a partir de distintos medios documentales (fuentes secundarias), tales como: publicaciones de instituciones oficiales nacionales e internacionales, cámaras de comercio, revistas sectoriales especializadas, estadísticas publicadas por instituciones bancarias, Instituto Nacional de Estadística, etc.

Por otra parte, en un estudio de mercado, también se obtienen datos de interés muy valiosos mediante la "fuente primaria" que consiste en obtener datos originales directamente por la propia empresa o por personal contratado por ella. Este sistema puede hacerse mediante entrevistas o encuestas a los clientes potenciales o existentes o bien a través de la facturación de los negocios ya en operación, con el fin de detectar algunos rasgos de interés.

En el caso que nos ocupa este proyecto, el mercado objetivo fundamental es la población española con patologías que afectan al aparato locomotor tales como la osteoporosis con pérdida ósea o enfermedades articulares (artrosis o artritis).

El estudio de mercado lo centraremos en la osteoporosis que es la patología más común del aparato locomotor, mientras que las enfermedades articulares suelen ser menos frecuentes, y en caso de presentarse, generalmente suele ser conjuntamente con la osteoporosis. De modo que con el tratamiento de la osteoporosis, simultáneamente ya se tratan las enfermedades articulares.

El objetivo fundamental de nuestro estudio de mercado se basa en detectar el porcentaje de población española que padece este tipo de patología, y por lo tanto determinar el número de personas susceptibles de ser potenciales clientes.

Este estudio no lo haremos a partir de la fuente primaria, porque resultaría muy caro y laborioso; en este caso es preferible acudir a fuentes secundarias tales como el Instituto Nacional de Estadística, la Organización Mundial de la Salud y revistas especializadas en medicina. En ambos casos se pueden obtener datos estadísticos muy precisos y fiables con un coste prácticamente nulo.



## **12.1. Clasificación de la osteoporosis (clientes potenciales).**

La osteoporosis se define como una enfermedad ósea metabólica caracterizada por disminución de la masa ósea y de su resistencia mecánica que ocasiona susceptibilidad para fracturas. Es la más frecuente de las enfermedades óseas metabólicas.

### **CLASIFICACIÓN DE LA OSTEOPOROSIS:**

#### **1- Osteoporosis Primarias:**

Constituyen el grupo más amplio e incluye los casos de osteoporosis en los que no se identifica ninguna enfermedad que la justifique directamente. Se distinguen las siguientes:

##### *- Osteoporosis idiopática juvenil y osteoporosis del adulto joven:*

Afecta a niños o adultos jóvenes de ambos sexos con función gonadal normal. La osteoporosis idiopática juvenil es un trastorno raro, que se inicia generalmente entre los 8 y los 14 años. El trastorno remite por sí solo en muchos casos y la recuperación ocurre de forma espontánea en un plazo de 4 ó 5 años.

La osteoporosis idiopática del adulto joven se observa en varones jóvenes y mujeres premenopáusicas en las que no se objetiva ningún factor etiológico. El comienzo del trastorno en algunas mujeres aparece con el embarazo o poco después. Estas mujeres presentan disminuciones de la densidad ósea del hueso tabecular que puede permanecer baja durante muchos años. Los estrógenos no son eficaces en este tipo de osteoporosis. La evolución es variable y a pesar de que los episodios de fracturas recidivantes son características, no se produce un deterioro progresivo de todos los enfermos.

##### *- Osteoporosis de tipo I. (Osteoporosis postmepáusica):*

Ocurre en un subgrupo de mujeres posmenopáusicas de 51 a 75 años y se caracteriza por una pérdida acelerada y desproporcionada de hueso trabecular (alta remodelación ósea). Las fracturas de los cuerpos vertebrales y de la porción distal del radio son complicaciones frecuentes.

##### *- Osteoporosis de tipo II. (Osteoporosis senil):*

Se detecta en algunas mujeres y varones de más de 70 años como consecuencia de un déficit de la función de los osteoblastos (bajo remodelado óseo). Otros factores etiopatogénicos son: sedentarismo-inmovilización, peor absorción intestinal de calcio, menor insolación y trastornos nutricionales que ocasionan déficit de vitamina D e hiperparatiroidismo secundario. Se asocia con fracturas de cuello femoral, porción próxima del humero y pelvis, por afectarse tanto el hueso cortical como el trabecular.



## **2- Osteoporosis secundarias:**

Se clasifican en este grupo todos aquellos casos de osteoporosis que son una consecuencia o bien una manifestación acompañante de otras enfermedades o de su tratamiento. Las causas que la ocasionan pueden ser numerosas y muy diversas.

### **FACTORES DE RIESGO:**

#### **1- Menopausia:**

Supone la condición de riesgo más importante para esta enfermedad. En el mundo occidental se mantiene la edad media de presentación de la menopausia a los 49 años mientras que, la esperanza de vida ha aumentado hasta superar los 80 años. Esto condiciona que la mujer pase más de la tercera parte de su vida en menopausia. Circunstancia que justifica que la prevalencia de la osteoporosis haya aumentado de forma notable en los últimos años.

#### **2- Edad:**

Es un factor de riesgo independiente para desarrollar una osteoporosis, pero está intensamente relacionado con la menopausia en la mujer. En el hombre la edad es un factor de riesgo más específico y de hecho, en edades por encima de los 75 años tiende a igualarse la proporción mujer/hombre con osteoporosis que pasa a ser de 2:1 cuando, en edades más jóvenes esta proporción es de 8/1. Con la edad se producen múltiples condicionantes fisiopatológicos: menor actividad osteoblástica ósea, menor absorción intestinal de calcio, defectos nutricionales, carencia de vitamina D, baja exposición solar y sedentarismo entre otros.

## **12.2. Impacto de la osteoporosis sobre la población.**

En el apartado anterior (12.1.) hemos analizado los diversos tipos de osteoporosis, dentro de los cuales, nuestros clientes objetivo serán aquellos que correspondan al sector de mayor riesgo, que viene determinado por la osteoporosis primaria, y dentro de ella, las de tipo I (osteoporosis posmenopáusica) y la tipo II (osteoporosis senil). El resto de grupos de osteoporosis no suponen una cuota importante de mercado, aunque también constituyen usuarios potenciales de nuestros equipos.

A partir de diversas publicaciones e informe médicos se ha extraído unas conclusiones que reflejan la situación actual de la osteoporosis tanto en el panorama internacional como nacional. Estas conclusiones proceden fundamentalmente de:

- *Revista de Postgrado Vía Cátedra de Medicina Nº 144, abril 2005 (pág. 24-27).*



- *Manual científico "Nutrición y Salud Ósea", editado por el Instituto Omega 3 de la Fundación Puleva y la Fundación Hispana de Osteoporosis y Enfermedades Metabólicas Óseas, en colaboración con la sociedad Española de Investigaciones Óseas y Metabolismo Mineral, que se ha presentado en el Ilustre Colegio Oficial de Médicos de Madrid.*

A continuación se pasa a exponer las conclusiones más significativas de cara a nuestra previsión de mercado potencial.

En la actualidad la osteoporosis es una enfermedad muy frecuente, pero su prevalencia real es difícil de establecer, ya que es una enfermedad asintomática hasta la aparición de complicaciones, lo que hace difícil la identificación de las personas que padecen la enfermedad. Según la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.), la prevalencia se estima en un 30% de las mujeres caucásicas y en un 8% de los varones caucásicos mayores de 50 años, y asciende hasta un 50% en mujeres de más de 70 años.

La osteoporosis es un problema de salud pública global que afecta actualmente a más de 200 millones de personas en el mundo.

**Unión Europea:** Esta enfermedad afecta al 35% de las mujeres españolas mayores de 50 años, porcentaje que se eleva a un 52% en el caso de las mayores de 70 años. La incidencia de fracturas de cadera en pacientes mayores de 50 años es de 1,3 a 1,9 casos por 1000 habitantes por año. En la mayoría de los pacientes con osteoporosis la incidencia de nuevas fracturas vertebrales a los 3 a 4 años es del 3 a 4%.

**Costes:** Los costes directos de fracturas de cadera como consecuencia de la osteoporosis alcanzaron en Europa 4.800 millones de euros en el año 2000 sólo en gastos hospitalarios, lo que ha supuesto un incremento del 33% en tres años. Este coste, derivado del gasto que suponen las hospitalizaciones, asciende a 220 millones de euros anuales.

País	2000	1996
Austria	156,00	146,32
Bélgica	160,00	113,83
Dinamarca	47,97	47,97
Finlandia	150,00	22,68
Francia	600,00	560,86
Alemania	1.462,24	1.401,97
Grecia	44,55	47,81
Irlanda	8,29	3,97
Italia	555,86	204,91
Holanda	180,37	180,37
Portugal	51,32	27,45
España	220,00	216,05
Suecia	300,00	101,03
Reino Unido	847,28	530,21



<b>Total</b>	4.800,00	3.600,00
--------------	----------	----------

*Datos en millones de euros. / \*Última cantidad disponible entre 1996 y 2000  
Fuente: Comisión Europea.*

Figura 12.1. Costes hospitalarios anuales directos de fracturas de cadera

**Estados Unidos de América:** cerca de 30 millones de personas están afectadas por la osteoporosis, mientras que otros 34 millones están en riesgo de desarrollar la enfermedad, donde el 80% son mujeres. Tiene una incidencia estimada de 1,5 millones fracturas al año. Los costos directos atribuibles a la osteoporosis para 1995 fueron estimados en 18 billones de dólares. Si se suman los costos indirectos de la pérdida de productividad y la mortalidad prematura derivada de las fracturas que se producen a causa esta enfermedad, el gasto se sitúa entre los 4.500 y 6.400 millones de dólares.

**América Latina:** Es difícil evaluar el impacto de la osteoporosis sobre América Latina ya que contamos con pocos estudios. En la ciudad de Buenos Aires solamente la cuarta parte de las mujeres posmenopáusicas conserva su Densidad Mineral Ósea dentro de valores normales. En Venezuela el 30% de la población mayor de 50 años resultó osteoporótica. La incidencia de osteoporosis son virtualmente desconocidas. En Brasil se diagnostica sólo a una de cada tres personas con osteoporosis y de ellas, sólo una de cada cinco recibe algún tipo de tratamiento. Allí se producen aproximadamente 100.000 fracturas de cadera anualmente.

No se ha podido encontrar datos sobre el costo que representa en la actualidad la osteoporosis en América latina, pero se estima que para el año 2050 los latinoamericanos sufrirán 655.000 fracturas de cadera, con un costo anual de 13 billones de dólares.

**Conclusión:** La osteoporosis afecta a una gran parte de la población mundial mayor de 50 años. Según la Organización Mundial de la Salud es el segundo problema sanitario asistencial en el mundo después de las enfermedades cardiovasculares y actualmente representa el 20%.

Sus complicaciones por un lado disminuye la calidad de vida y por otro lado acarrea un alto costo. Se debe agregar que en todo el mundo existe una tendencia al aumento de la población mayor de 60 años y al crecimiento en la esperanza de vida que lleva a un incremento de la población de la edad avanzada con el consiguiente aumento de la osteoporosis y de las fracturas asociadas. Es una enfermedad que necesita para su prevención una mayor educación y concienciación de la población para obtener el beneficio de una mejor calidad de vida, menos gastos en salud y una mayor productividad que redundará en beneficio de la salud y de la economía de la comunidad.

### 12.3. Osteoporosis en España.

En el apartado anterior hemos analizado de forma global el impacto de la osteoporosis en Europa, Estados Unidos, y América Latina. El objetivo de este proyecto, en una primera fase es centrarse en el mercado nacional





de España, y en función de sus resultados en el futuro, intentar atacar otros mercados internacionales. Por lo tanto, en esta primera fase nos centraremos en el mercado nacional, para lo cual analizaremos la situación de la osteoporosis en España.

Partiendo de las mismas fuentes que en el apartado 12.2., las conclusiones más significativas que resumen la situación actual de la osteoporosis en España son las que a continuación se exponen.

En la actualidad en la población española hay cerca de 3,5 millones de personas que padecen de osteoporosis y cada año se producen más de 100.000 fracturas osteoporóticas de las cuales 60.000 corresponden a fracturas de cadera.

Del total de los 3,5 millones de personas con osteoporosis cerca de 2,5 millones corresponden a mujeres, afectando a un 35% de las mayores de 50 años. El riesgo de sufrir esta patología va aumentando a medida que pasa el tiempo, de modo que las mujeres de más de 75 años tienen un 83% de riesgo de padecerla. Según datos de la Fundación Hispana de Osteoporosis y Enfermedades Metabólicas, solamente 300.000 mujeres están diagnosticadas.

Las 60.000 fracturas de cadera que se producen anualmente como consecuencia de la osteoporosis suponen una ocupación entre el 20% y el 22% de las camas de los servicios de Cirugía Ortopédica y Traumatología. Este tipo de fracturas presenta una mortalidad en el primer año del 33%, recuperando solo el 28% de los pacientes que sobreviven a la situación previa.

A partir de los 50 años, una de cada 3 mujeres y uno de cada 8 hombres sufrirán, al menos, una fractura provocada por la osteoporosis a lo largo de la vida. A pesar de ello el 80% de las mujeres afectadas no es consciente de los factores de riesgo antes de que se les diagnostique la enfermedad, y sólo el 10% de las mujeres con osteoporosis reciben tratamiento. La consecuencia principal de esta patología son las fracturas de cadera, de columna vertebral y de muñeca. El tipo de fractura osteoporótica más frecuente es la fractura o aplastamiento vertebral, casi tres veces más habitual que la de cadera, constituyendo alrededor del 44% del total de las fracturas asociadas a la osteoporosis.

Toda esta panorámica analizada a partir de fuentes fiables que resume las conclusiones de la Organización Mundial de la Salud (O.M.S.), nos indica que el problema de la osteoporosis afecta a un gran sector de la población que en España se sitúa en torno a los 3,5 millones de personas.

Tal como ya se ha comentado anteriormente, se trata de una enfermedad asintomática hasta la aparición de complicaciones, lo que hace difícil la identificación de las personas que padecen esta patología. También hay que tener en cuenta que se trata de una enfermedad degenerativa cuya evolución declina hacia un agravamiento progresivo, con lo cual es mucho más difícil de detectar en las primeras etapas. Por lo tanto aunque las

estimaciones más reales sean las que se han reflejado a partir del estudio anterior, hay que tener en cuenta que las estimaciones registradas pueden ser inferiores a consecuencia de esta falta de síntomas en las primeras etapas y a la falta de concienciación por parte de la población de la gravedad de esta enfermedad.

De cara a nuestra previsión actual del mercado real, pueden ser más significativas las estadísticas del Instituto Nacional de Estadística. Por lo tanto, partiendo de la Encuesta Nacional de Salud, las últimas estadísticas registradas, que corresponden al año 2003 nos refleja la situación por sexo y grupos de edad que a continuación se indican en las tablas 12.2, 12.3 y 12.4. Se ha considerado únicamente los grupos de edad de mayor riesgo que comienza a partir de los 45 años.

MUJERES			
EDAD	POBLACIÓN TOTAL	ENFERMOS OSTEOPOROSIS	PORCENTAJE OSTEOPOROSIS
De 45 a 54 años	2676,3	155,8	5,82
De 55 a 64 años	2207,7	308,8	13,99
De 65 a 74 años	2220,7	432,6	19,48
De 75 y más años	1777,9	416,5	23,43
TOTAL	8882,6	1313,7	14,79

Figura 12.2. Encuesta nacional de osteoporosis en mujeres en el año 2003

VARONES			
EDAD	POBLACIÓN TOTAL	ENFERMOS OSTEOPOROSIS	PORCENTAJE OSTEOPOROSIS
De 45 a 54 años	2637,6	9,8	0,37
De 55 a 64 años	2085,9	30,0	1,44
De 65 a 74 años	1758,0	47,5	2,7
De 75 y más años	1200,6	29,6	2,46
TOTAL	7682,1	116,9	1,52

Figura 12.3. Encuesta nacional de osteoporosis en varones en el año 2003

AMBOS SEXOS			
EDAD	POBLACIÓN TOTAL	ENFERMOS OSTEOPOROSIS	PORCENTAJE OSTEOPOROSIS
De 45 a 54 años	5313,9	165,6	3,12
De 55 a 64 años	4293,6	338,9	7,89
De 65 a 74 años	3978,7	480,1	12,07
De 75 y más años	2978,6	446,1	14,98
TOTAL	16564,8	1439,7	8,69

Figura 12.4. Encuesta nacional de osteoporosis en ambos sexos en el año 2003

Si comparamos las estadísticas de mujeres con osteoporosis a partir de la menopausia, observamos que según el Instituto Nacional de Estadística está en torno al 15% frente a un 30% según la Organización Mundial de la Salud. La diferencia es significativa por las causas expuestas anteriormente. Esta diferencia es más pronunciada para los varones que pasa del 1,5% (I.N.E.) al 8% (O.M.S.).

En la previsión de mercado real actual en España consideraremos las cifras más desfavorables, que corresponden al Instituto Nacional de Estadística, que en este caso se sitúa en torno a 1,4 millones de mujeres, y si incluimos los varones la cifra se situaría en torno a 1,5 millones de personas.

Sin embargo, si el estudio lo consideramos a largo plazo, estas cifras podrían aproximarse prácticamente al doble, con lo cual, en la población española hablaríamos de 3 a 3,5 millones de enfermos de osteoporosis.

**Conclusión:** Nuestro mercado objetivo actual se sitúa alrededor de 1,5 millones de personas.

En el gráfico 12.5. se representa el porcentaje de osteoporosis por grupos de edad para cada sexo y para ambos sexos en conjunto. En el gráfico se evidencia que hay mucha más población femenina registrada con esta patología que varones. También se evidencia que el factor riesgo aumenta con la edad.

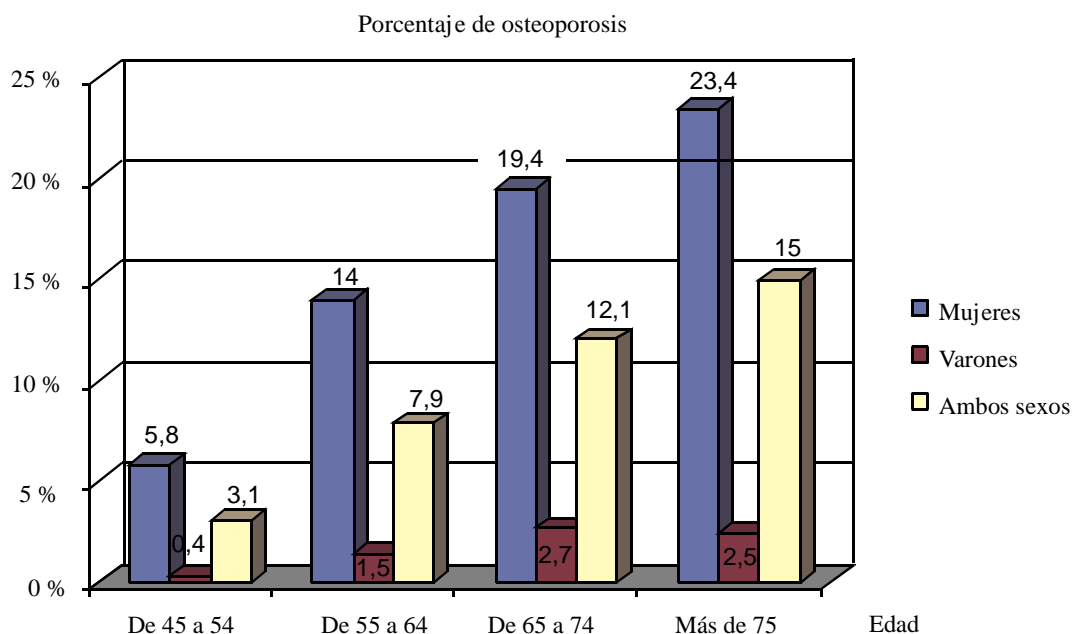


Figura 12.5. Proporción de osteoporosis por grupos de edad en el año 2003

Con el objetivo de planificar la previsión de clientes potenciales en un horizonte temporal de 20 años se estima que puede ser interesante la proyección de la población española dentro de los grupos de edades con riesgo a la osteoporosis.

Por lo tanto, a partir de las estadísticas obtenidas del Instituto Nacional de Estadística se ha obtenido la proyección de población de mujeres y de varones en grupos de edad que comienzan a partir de los 45 años. Se observa una tendencia al aumento de estos grupos de edad como consecuencia del envejecimiento de la población española.

Proyección de población total de mujeres											
Edad	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021	2023	2025
45 a 49 años	1482	1576	1656	1726	1784	1827	1865	1917	1978	2025	2025
50 a 54 años	1299	1366	1461	1555	1637	1707	1774	1822	1860	1904	1962
55 a 59 años	1234	1267	1295	1343	1422	1517	1603	1679	1746	1804	1846
60 a 64 años	1065	1159	1220	1258	1277	1315	1376	1465	1556	1636	1704
65 a 69 años	1012	977	1018	1101	1174	1221	1248	1273	1318	1394	1484
70 a 74 años	1063	1053	1006	947	959	1015	1099	1154	1190	1208	1243
75 a 79 años	896	936	965	978	945	898	870	908	983	1049	1092
80 a 84 años	649	695	735	773	809	834	831	800	760	776	826
85 y más años	551	607	677	753	832	915	1000	1080	1148	1182	1201

Figura 12.6. Proyección de población total de mujeres hasta el año 2025

Proyección de población total de Varones											
Edad	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021	2023	2025
45 a 49 años	1471	1572	1660	1741	1815	1878	1938	2011	2087	2142	2141
50 a 54 años	1272	1336	1430	1527	1617	1696	1776	1841	1901	1966	2041
55 a 59 años	1178	1211	1240	1287	1364	1460	1551	1634	1712	1784	1845
60 a 64 años	991	1077	1132	1169	1191	1230	1288	1376	1468	1554	1630
65 a 69 años	887	865	911	987	1051	1095	1124	1152	1198	1270	1359
70 a 74 años	869	864	827	788	809	863	937	987	1022	1045	1082
75 a 79 años	651	689	719	735	715	686	675	717	781	837	876
80 a 84 años	400	437	469	502	535	559	564	548	530	552	596
85 y más años	243	275	317	362	407	455	505	552	591	610	621

Figura 12.7. Proyección de población total de varones hasta el año 2025

Con los datos de las tablas anteriores se ha confeccionado otra tabla con la proyección de la población total de ambos sexos en grupos de edad más agregados. En la tabla que a continuación se muestra (figura 12.8.) se indican los grupos de edad de 45 a 54 años, de 55 a 64 años, de 65 a 74 años y de 75 años en adelante. Esta proyección temporal se estima hasta el año 2025.

Proyección de población total de ambos sexos											
Edad	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017	2019	2021	2023	2025
45 a 54 años	5525	5852	6208	6551	6854	7109	7354	7593	7828	8039	8171
55 a 64 años	4471	4715	4888	5059	5256	5523	5820	6154	6485	6778	7026
65 a 74 años	3833	3760	3763	3825	3995	4196	4409	4567	4730	4919	5170
75 y más años	3392	3643	3886	4105	4246	4349	4448	4607	4796	5009	5215

Figura 12.8. Proyección de población total de ambos sexos hasta el año 2025

Partiendo de la tabla anterior se deduce un importante aumento de la población en todos los grupos de edad con riesgo de osteoporosis.

Así pues, los aumentos porcentuales los grupos de población desde el año 2005 hasta el año 2025 es el que se indica en la tabla 12.9.

Grupo de edad	Incremento de población hasta 2025
45 a 54 años	47,9 %
55 a 64 años	57,1 %
65 a 74 años	34,8 %
75 y más años	50,7 %
<b>De 55 y más años (agregado)</b>	<b>48,8 %</b>

Figura 12.9. Aumento de la población mayor de 45 años hasta el 2025

Considerando como grupo agregado de riesgo importante aquel que parte de la edad de 55 años en adelante, el aumento porcentual de este grupo desde el año 2005 hasta el año 2025 se situará prácticamente en un 49%.

Si en dicha fecha se mantiene la misma proporción de osteoporosis que en la actualidad, para el año 2025 podríamos hablar de cifras que se situaran por encima de los 5 millones de personas con osteoporosis.

Partiendo de los datos fijados en el cuadro anterior (figura 12.9), se pone de manifiesto un importante aumento de la población envejecida; que queda claramente reflejada la figura 12.10 que tenemos representada en la página siguiente.

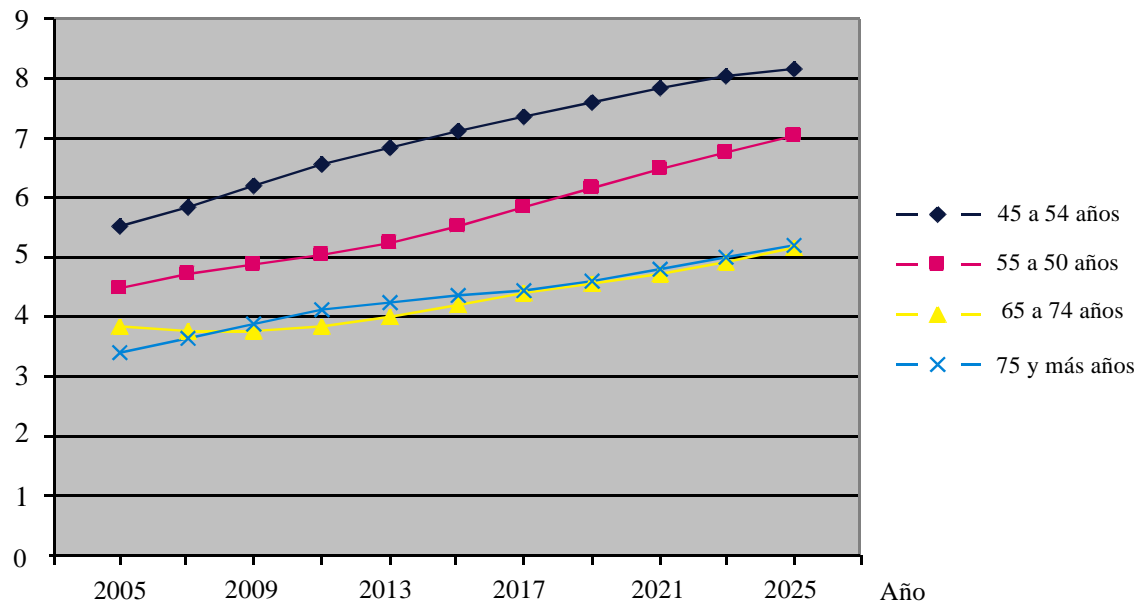
Millones de  
personas

Figura 12.10. Previsiones de edad por grupos de edades hasta el año 2025

Del estudio anterior se deduce un importante aumento del envejecimiento de la población española y por consiguiente también un aumento en la misma proporción de la osteoporosis. Como consecuencia de esta situación, el diseño y desarrollo de un equipo de campos magnéticos pulsantes para la aplicación al tratamiento de la osteoporosis, hace que este proyecto sea viable y con perspectivas de éxito tanto en el momento actual como en un futuro a medio y largo plazo.

### **13. Efectos biológicos de un campo magnético vectorial nulo creado en el interior de la bobina.**

Cabe destacar la aportación que ha realizado en el campo de la magnetoterapia el doctor en Física por la Universidad de Barcelona, y profesor titular del departamento de Física Aplicada de la UPC (Universidad Politécnica de Catalunya); Fidel Franco González.



Figura 13.1. Doctor y profesor Fidel Franco González

Su teoría está basada en los efectos beneficiosos resultantes de aplicar un campo magnético vectorial nulo creado en el interior de la bobina, para ser aplicado a los pacientes en cuestión. Las bases de su teoría se pueden resumir al medir el campo magnético en los solenoides fabricados por la empresa Kádex; ya que él mismo es el diseñador y encargado de proponer las instrucciones sobre el método de construcción.

Al realizar la medición del campo con el gausímetro, obtenemos que un campo nulo a pesar de circular la corriente por la bobina. Es decir, se ha construido una resistencia multifilar que según el electromagnetismo clásico tiene una inductancia nula; pues la suma de los campos vectoriales creados en el interior de la bobina es nula. Sin embargo, según establece Fidel Franco; la energía no desaparece, no es nula, sigue estando allí aunque ya no exista un campo vectorial. Ahora lo que existe es un campo de potencial escalar (también llamado campo no-hertziano o simplemente un campo magnético escalar). Esta base tiene como objetivo sus efectos a nivel biológico, que según su teoría son mucho más acusados que los campos vectoriales clásicos.

Esta teoría no resulta del todo contrastada hoy en día, ya que los libros de Física no tratan estos tipos de campos pero según el autor de ésta teoría; existen.

Podemos obtener ese campo nulo con la bobina diseñada, modelizada y analizada que hemos construido en el presente proyecto. Para los cálculos hemos tenido en cuenta que el diámetro del hilo de cobre del arrollamiento de la bobina de 1 mm, pero en realidad nuestra bobina está construida con dos cables de cobre de diámetro 0.7 mm en paralelo; que a efectos referentes a los cálculos realizados, resultan ser idénticos.





Por tanto la sección de los dos cables de cobre en paralelo de 0.7 mm de diámetro, resulta ser la misma sección que un cable de 1 mm de diámetro:

$$S_{1mm} = \pi R^2 = \pi(0.5)^2 = 0.7853mm^2 \approx 0.7mm^2$$

$$S_{0.7mm} = \pi R^2 = \pi(0.35)^2 = 0.3848mm^2, \text{ que al ser dos en paralelo,}$$

$$S_{2 \times 0.7mm} = 2\pi R^2 = 0.7696mm^2 \approx 0.7mm^2$$

Con los dos cables en paralelo y con la misma sección, conseguimos que la bobina no sobrepase sus valores nominales de operación que hemos tenido en cuenta a la hora de los cálculos analíticos y en consecuencia (recordemos, máximo 4 Amperios de pico para generar el campo de 75 Gauss); evitamos un posible quemado de la misma.

Por cada cable de diámetro 0.7 mm, pasarán 2 Amperios y se generará un campo de aproximadamente 37.5 Gauss. Por tanto al estar en paralelo, sus campos se suman y la generación resulta de los 75 Gauss como ya hemos especificado en anteriores apartados (por el cable de 1 mm de diámetro pasarán los 4 Amperios totales, resultando lo mismo ya que genera el mismo campo de 75 Gauss). Por tanto para generar el campo magnético nulo, debemos conseguir que ambos campos de 37.5 Gauss se anulen y esto lo conseguimos conectando las dos bobinas en antiparalelo, es decir, en paralelo pero con la polaridad invertida.

Finalmente y en vista a lo expuesto, conectando las dos bobinas en antiparalelo generaremos dos campos magnéticos vectoriales de igual intensidad pero de sentido opuesto dando lugar al un campo vectorial nulo en el centro de la bobina; alcanzando el objetivo que nos marca la teoría establecida por Fidel Franco para obtener los efectos beneficiosos que dicho campo, que en teoría resulta ser un campo magnético escalar, proporciona en las personas que se exponen al mismo.



## 14. Bibliografía.

- **Bardasano Rubio, José Luis; Elorrieta Pérez de Diego, José Ignacio.** *Bioelectromagnetismo. Ciencia y Salud.* Editorial Mc Graw Hill - Serie de divulgación científica, 2000 - Madrid.
- **Rodríguez Martín;** *Electroterapia en fisioterapia.*
- **Aramburu de Vega, Cristina; Muñoz Díaz, Emilio; Celedonia Igual, Camacho.** *Electroterapia, termoterapia e hidroterapia.* Editorial Síntesis, 1998 - Madrid.
- **Sodi Pallarés, Demetrio** (1994). *Magnetoterapia y tratamiento metabólico.* México: Edita el autor.
- **Jerabek, Jiri; Pawluk, William.** *Magnetic Therapy in Eastern Europe, a review of 30 years of Research.* 1998
- **Philpott, William; Taplin, Sharon.** *Guía de Magnetoterapia Médica.* Mandala Ediciones, 1994 Madrid.
- **Coghill, Roger.** *El libro de la Magnetoterapia.* Editorial Sirio, 2000 – Buenos Aires.
- **Labajos Claros, Mariano; Caroli; Martinez Morillo; Diez de los rios** (1986). *Curso de Magnetoterapia Aplicada en Medicina.* Universidad de Málaga.
- **Madroñero, A; Galvez Failde, J.M. y otros.** *Magnetoterapia: bases físicas y biológicas de su aplicación terapéutica.* Centro de Rehabilitación MAPFRE. 1990- Madrid
- **Pinedo, Manuel Rozalen.** *Tesis: Interacción de los campos magnéticos en el metabolismo de las grasas: estudio experimental en ratas.* Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Medicina. Madrid 2001.
- **Martín del Brio, Bonifacio.** *Sistemas electrónicos basados en Microprocesadores y Microcontroladores.* Colección textos docentes. Prensas Universitarias de Zaragoza, 1999 – Zaragoza.
- **Serway, Raymond A.** *Electricidad y Magnetismo.* Editorial McGraw-Hill. 1997. México.



- **Pardina Carrera, Antonio.** *Apuntes de Electricidad y Magnetismo.* Escuela de Ingeniería Técnica Industrial Zaragoza, Especialidad Electricidad.

- **Pardina Carrera, Antonio.** *Apuntes de Tecnología eléctrica y electrónica.* Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de Producto. Universidad de Zaragoza.

- **Franco González, Fidel.** *Efectos de los campos de energía sobre el ser humano. Fundamentos físicos de las medicinas energéticas.* Editorial Indigo. 1997. Barcelona.